

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Володимир ЄРЕМЕНКО
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

**на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Метрологія та вимірювальна техніка»
зі спеціальності**

**152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
на тему: «Система калібрування геометричних розмірів отворів»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ПВ-91мп
Малішевський Дмитро Олександрович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н., доцент
Мокійчук Валентин Михайлович _____

Консультант з розділу «Розробка стартап-проекту»:

Доцент, к.е.н., доцент
Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

Доцент, к.т.н., доцент
Галаган Роман Михайлович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.
Студент _____

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітньо-професійна програма – Метрологія та вимірювальна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Малішевському Дмитру Олександровичу

1. Тема дисертації «Система калібрування геометричних розмірів отворів»
науковий керівник дисертації Мокійчук Валентин Михайлович, к.т.н., доцент,
затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації 09 грудня 2020 р.
3. Об'єкт дослідження: засоби вимірювання геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню.
4. Вихідні дані до проекту: максимальна відстань до об'єкту спостереження - не більше 3 м; похибка вимірювання – не більше 2,5 %; основні функції – отримання та формування цифрового зображення розпізнавання границь зображень отворів; визначення розмірів отворів.
5. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Огляд та аналіз методів та засобів вимірювання геометричних розмірів отворів. Огляд та аналіз програмного забезпечення для вимірювання геометричних розмірів. Огляд та аналіз алгоритмів калібрування. Розробка структурної схеми та аналіз похибок. Розробка віртуального макету системи вимірювання геометричних розмірів отворів. Дослідження метрологічних характеристик системи вимірювання геометричних розмірів отворів. Висновки.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: плакати формату А1 з результатами досліджень загальною кількістю не менше 7;

7. Орієнтовний перелік публікацій :

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	Бояринова К.О., к.е.н., доцент, викладач кафедри менеджменту		

9. Дата видачі завдання 23 жовтня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ	28.10. 2020р.	
2	Огляд та аналіз методів та засобів вимірювання геометричних розмірів отворів	09.11. 2020р.	
3	Огляд та аналіз програмного забезпечення для вимірювання геометричних розмірів	12.11. 2020р.	
4	Огляд та аналіз алгоритмів калібрування	15.11. 2020р.	
5	Розробка структурної схеми та аналіз похибок	22.11. 2020р.	
6	Розробка віртуального макету системи вимірювання геометричних розмірів отворів	30.11. 2020р.	
7	Дослідження метрологічних характеристик системи вимірювання геометричних розмірів отворів	01.12. 2020р.	
8	Стартап-проект	07.12. 2020р.	
9	Висновки	11.12. 2020р.	

Студент

(підпис)

Дмитро МАЛІШЕВСЬКИЙ

Керівник проекту

(підпис)

Валентин МОКІЙЧУК

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 89 с., 22 рис., 17 табл., 21 джерело.

Об'єкт дослідження – засоби вимірювання геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню.

Мета роботи – розробка системи калібрування геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню, а також створення віртуального макета для вимірювання геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню на базі графічного середовища розробки додатків NI LabVIEW.

Методи дослідження – аналіз та синтез, теоретичне моделювання, метрологічний аналіз.

Практична цінність роботи полягає в розробці віртуального макету для вимірювання геометричних розмірів отворів на базі графічного середовища розробки додатків NI LabVIEW.

Ключові слова: похибка, система вимірювання геометричних розмірів, обробка зображень, системи технічного зору, комп'ютерний зір.

ABSTRACT

Master's thesis: 89 p., 22 figures, 17 tables, 21 references.

Object of study – measuring the geometric dimensions of holes by their images.

Objective – development of a system for calibrating the geometric dimensions of holes by their images and development of a virtual instrument for measuring the geometric dimensions of holes by their images using LabVIEW.

Research methods – analysis and synthesis, theoretical modeling, metrological analysis.

The practical relevance of this work lies in development of a virtual instrument for measuring the geometric dimensions of holes by their images using LabVIEW.

Keywords: error, system for measuring geometric dimensions, image processing, technical vision, computer vision.

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	11
1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОТВОРІВ.....	14
1.1 Основні визначення.....	14
1.2 Огляд і аналіз методів вимірювання геометричних параметрів отворів.....	14
1.2.1 Координатний метод.....	14
1.2.2 Оптичний метод.....	16
1.2.3 Оптико-електронний метод.....	22
1.3 Аналіз існуючих вимірювачів та приклади застосування.....	26
1.3.1 Оптичний вимірювач геометричних розмірів прозорих тіл.....	26
1.3.2 Вимірювання геометричних параметрів отворів сит.....	27
1.4 Висновки.....	28
2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ.....	30
2.1 Мова програмування Python.....	30
2.2 Програмне середовище LabVIEW.....	33
2.3 Висновки.....	35
3 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ КАЛІБРУВАННЯ.....	37
3.1 Калібрування камери за допомогою об'єктива зі змінною фокусною відстанню.....	37
3.2 Алгоритм калібрування Хартлі.....	40
3.3 Метод епіполяричних ліній.....	41
3.4 Алгоритм калібрування Стурма.....	42
3.5 Алгоритм калібрування Мендонца і Чіполла.....	42
3.6 Висновки.....	43
4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОХИБОК.....	44
4.1 Розробка та розрахунок структурної схеми СВГР.....	44
4.1.1 Опис структурної схеми.....	45
4.1.2 Схема каналу вимірювання та рівняння похибки вимірювання.....	46
4.1.3 Розрахунок характеристик блоків структурної схеми.....	49
4.2 Методи покращення метрологічних характеристик засобів вимірювання геометричних розмірів отворів.....	57
4.2.1 Блок оптичного перетворення.....	57
4.2.2 Фотоматриця.....	59
4.3 Висновки.....	61
5 РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО МАКЕТУ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОТВОРІВ.....	62

5.1	Модель блоку оптичного перетворення.....	62
5.2	Моделювання системи вимірювання геометричних розмірів отворів в програмному пакеті LabVIEW.....	64
5.3	Висновки.....	67
6	ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОТВОРІВ....	68
6.1	Дослідження похибки алгоритму обчислення геометричних розмірів об'єкту.....	69
6.2	Загальне дослідження роботи віртуального макету.....	71
6.3	Дослідження впливу похибки позиціонування об'єкту.....	75
6.4	Дослідження алгоритму знаходження границь об'єкту в віртуальному макеті.....	78
6.5	Висновки.....	79
7	РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	80
7.1	Опис ідеї проекту.....	80
7.2	Технологічний аудит ідеї проекту.....	81
7.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	82
7.4	Розробка ринкової стратегії проекту.....	85
7.3	Розробка маркетингової програми проекту.....	87
7.6	Висновки.....	89
	ВИСНОВКИ.....	91
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

БОП – блок оптичного перетворення;

БП – буферний підсилювач;

БЖ – блок живлення;

Д – дисплей;

ДЦФ – дисплей цифрової фотокамери;

ІБ – інтерфейсний блок;

МК – мікроконтролер;

ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина;

ППЗП – програмований постійний запам'ятовуючий пристрій;

СВГР – система вимірювання геометричних розмірів об'єктів по їх зображенню;

ФМ – фотоматриця;

ЦФ – цифрова фотокамера;

d – відстань між лінзою і предметом;

a і b – розміри об'єкту;

d – відстань від ЦФ до об'єкту вимірювання;

D – відстань від лінзи до фотоматриці;

$D_{\text{БОП}}$ – відносний отвір БОП (діафрагма);

f – фокусна відстань БОП;

$f_{i,j}$ – значення яскравості пікселів;

h – лінійний розмір об'єкту вимірювання;

H – експозиція об'єкту вимірювання на фотоматрицю ЦФ;

H_r – матриця гомографії зображення;

I – глибина кольору зображення;

$K_{\text{БОП}}$ – коефіцієнт перетворення БОП;

$K_{\text{ФМ}}$ – коефіцієнт перетворення фотоматриці;

$K_{БП}$ – коефіцієнт перетворення буферного підсилювача;
 $K_{АЦП}$ – коефіцієнт перетворення аналого-цифрового перетворювача;
 $K_{МК}$ – коефіцієнт перетворення мікроконтролера;
 k_i – ваги;
 L – дійсне зображення об'єкту вимірювання, що надходить на вхід блока оптичного перетворення;
 M – об'єм пам'яті, яке займає одне зображення;
 N_x – код, що отримується в результаті перетворення;
 N – номінальне значення кількості ступенів квантування;
 n – кількість розрядів АЦП;
 $N_{П}$ – число пікселів фотоматриці.
 n_f – мінімальна кількість фотографій;
 p – довжина і ширина пікселя;
 S – мінімально необхідна роздільна здатність;
 S_M – площа фотоматриці;
 $S_{П}$ – площа пікселя фотоматриці;
 S_O – площа об'єкта;
 s – скаляр;
 t – номер кадру;
 $V_{ППЗУ}$ – об'єм пам'яті ППЗУ;
 W – множина пікселів, серед яких іде пошук медіани;
 $X_{реал}$ – дійсне значення розміру об'єкту;
 $X_{визн}$ – значення розміру об'єкту, що визначений віртуальним макетом.
 α, β – коефіцієнти стиснення по осям Ox і Oy відповідно;
 Δ_A – приведена адитивна похибка;
 $\Delta_{БОП}$ – приведена адитивна похибка БОП;
 $\Delta_{ФМ}$ – приведена адитивна похибка ФМ;
 $\Delta_{БУ}$ – приведена адитивна похибка БП;
 $\Delta_{АЦП}$ – приведена адитивна похибка АЦП;
 $\Delta_{МК}$ – приведена адитивна похибка обчислень;

- Δ_A – сумарна адитивна похибка СВГР;
 $\gamma_{\text{кв}}$ – похибка квантування АЦП;
 Δ_a – похибка визначення ширини об'єкта;
 Δ_b – похибка визначення довжини об'єкта;
 Δ_L – адитивна похибка позиціонування об'єкта;
 $\Delta_{\text{БОП}}$ – адитивна похибка перетворення блока оптичного перетворення;
 $\Delta_{\text{ФМ}}$ – адитивна похибка фотоматриці;
 $\Delta_{\text{БУ}}$ – адитивна похибка буферного підсилювача;
 $\Delta_{\text{АЦП}}$ – адитивна похибка АЦП;
 $\Delta_{\text{МК}}$ – адитивна похибка розрахунку (МК+ПЕОМ).
 $\delta_{\text{БОП}}$ – мультиплікативна похибка перетворення блока оптичного перетворення;
 $\delta_{\text{нл}}$ – похибки нелінійності АЦП;
 δ_{Σ} – сумарна відносна похибка СВГР;
 δ_M – сумарна мультиплікативна похибка СВГР;
 $\delta_{\text{вм}}$ – відносна похибка вимірювання розмірів об'єкту;
 $\delta_{\text{ФМ}}$ – мультиплікативна похибка фотоматриці;
 $\delta_{\text{БУ}}$ – мультиплікативна похибка буферного підсилювача;
 $\delta_{\text{АЦП}}$ – мультиплікативна похибка АЦП;
 $\delta_{\text{МК}}$ – мультиплікативна похибка розрахунку (МК+ПЕОМ);
 $\delta_{\text{Мрз}}$ – похибка роздільної здатності фотоматриці за площиною;
 $\delta_{\text{Мсп}}$ – похибка перетворення в світловий потік фотоматриці;
 γ – коефіцієнт асиметрії між осями зображення;
 λ – кут між крайнім променем конічного світлового потоку на вході БОП і його оптичною віссю (половина кута огляду БОП);
 \hat{h}_i – i -та строчка матриці;
 V_j, Ψ_i – коефіцієнти впливу похибок окремих блоків;

ВСТУП

Сучасне промислове виробництво характеризується необхідністю витримування великої кількості параметрів виробів в заданих діапазонах. Одними з основних параметрів, що контролюються, є геометричні розміри. Слід зазначити, що у виробництві дуже часто здійснюються вимірювання отворів прямокутної або округлої форми в різних деталях.

На сьогоднішній день широке розповсюдження отримали методи вимірювання геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню, що представлені у вигляді цифрового фотознімку та отримані за допомогою цифрової фото- або відео- камери.

Визначення геометричних параметрів зображень об'єктів широко використовується в медичній, автомобільній, гірничій та інших галузях промисловості.

Незважаючи на поширеність подібних систем, недостатньо вирішено питання похибок вимірювання, калібрування та створення спеціалізованого програмного забезпечення. Тому дана проблема є актуальною.

Мета роботи: Розробка системи калібрування геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню, а також створення віртуального макета для вимірювання геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню на базі графічного середовища розробки додатків NI LabVIEW.

Об'єкт дослідження: засоби вимірювання геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню.

Предмет дослідження: структури, алгоритми калібрування, технічні та метрологічні характеристики засобів вимірювання геометричних розмірів отворів та їхнє програмне забезпечення.

Задачі дослідження:

- 1) провести аналіз методів та засобів вимірювання геометричних розмірів;

- 2) провести аналіз програмного забезпечення для задач вимірювання геометричних розмірів;
- 3) провести аналіз алгоритмів калібрування;
- 4) розробити структурну схему вимірювання геометричних розмірів отворів;
- 5) провести аналіз похибок;
- 6) розробити віртуальний макет на базі графічного середовища розробки додатків NI LabVIEW;
- 7) дослідити метрологічні характеристики розробленої системи вимірювання геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню.

Практична цінність роботи полягає в розробці віртуального макету для вимірювання геометричних розмірів отворів на базі графічного середовища розробки додатків NI LabVIEW.

Методи досліджень

Для вирішення поставлених задач в магістерській дисертаційній роботі використані методи аналізу теорії і практики застосування методів вимірювання геометричних розмірів отворів, методи сучасного комп'ютерного моделювання.

Для підтвердження ефективності та достовірності запропонованих методів проводилися дослідження розробленого віртуального макету.

Структура і обсяг роботи

Магістерська дисертація складається зі вступу, 7 розділів і висновку, викладених на 93 сторінках машинописного тексту. Містить 22 рисунка, 19 таблиць. Бібліографічний список включає в себе 21 джерело.

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовані загальна мета і завдання дослідницької роботи, практична цінність роботи. Представлена коротка анотація розділів дисертації.

У 1 розділі розглянуто існуючі методи вимірювання геометричних параметрів об'єктів. Наведена схема отримання та обробки вимірювальної інформації в загальному вигляді. Наведено огляд існуючих оптичних і оптико-

електронних систем вимірювання геометричних розмірів об'єктів. Наведено також приклади застосування розглянутих методів.

У 2 розділі було розглянуте програмне забезпечення, що може бути використане в задачах обробки цифрових зображень. Проведено їхнє порівняння у контексті задачі вимірювання геометричних розмірів отворів по цифровому зображенню.

У розділі 3 проведено огляд та аналіз алгоритмів калібрування камери. Були розглянуті переваги алгоритмів та обраний алгоритм, що забезпечує оптимальний баланс точності та простоти реалізації.

У розділі 4 розроблена структурна схема СВГР, на основі якої наведено алгоритм розрахунку блоків структурної схеми СВГР. На підставі розробленої структурної схеми запропоновано алгоритм розрахунку розмірів об'єкту.

У розділі 5 отримано розрахункові співвідношення та розроблено віртуальний макет системи вимірювання геометричних розмірів отворів у програмному середовищі LabVIEW.

У розділі 6 проведено дослідження метрологічних характеристик розробленої системи вимірювання геометричних розмірів об'єктів, а саме: загальне дослідження віртуального макету, дослідження впливу похибки БОП, дослідження впливу похибки фокусування БОП, дослідження впливу похибки роздільної здатності фотоматриці та дослідження алгоритму знаходження границь об'єкту в віртуальному макеті.

У розділі 7 наведено результати розробки стартап-проекту.

У висновку сформульовані основні результати магістерської дисертаційної роботи і проведених досліджень.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОТВОРІВ

1.1 Основні визначення

Визначення геометричних параметрів широко застосовується у медичній, автомобільній, гірничій та інших галузях промисловості, які пов'язані з обробкою матеріалів та деталей по заданим розмірам. Від точності вимірювань, які виконуються в процесі визначення геометричних параметрів, залежать показники виробництва і якості продукції.

Серед численних завдань найбільш поширеними є вимірювання лінійних розмірів отворів.

Розглянемо основні методи і засоби вимірювання геометричних параметрів отворів.

1.2 Огляд і аналіз методів вимірювання геометричних параметрів отворів

1.2.1 Координатний метод

Для комплексної оцінки геометрії отворів застосовується координатний метод. Координатні вимірювання – вимірювання геометричних параметрів (деталей) шляхом визначення координат окремих точок поверхонь об'єкта, в обраній системі координат (прямокутній декартовій, циліндричній або сферичній) і подальшої математичної обробки вимірних координат для визначення розмірів (рис. 1.1).

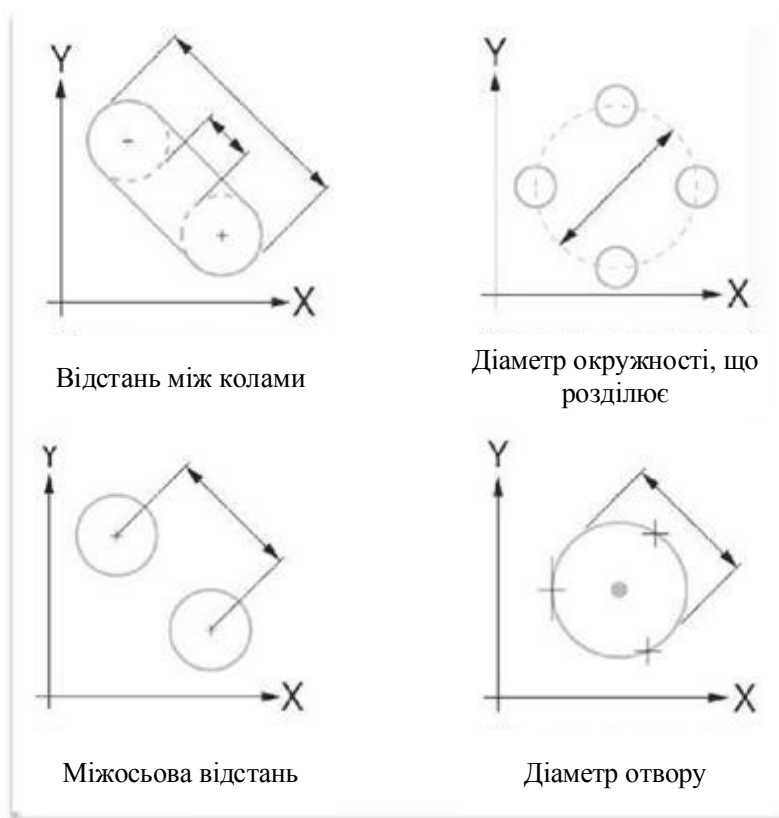


Рисунок 1.1 – Приклади координатних вимірювань геометричних параметрів отворів

За координатних вимірюваннях визначають значення координат окремих точок (точок вимірювання) реальних поверхонь (або поверхні) вимірюваного об'єкта (в даному випадку – отвору). Вимірювання проводять від єдиної бази – системи координат.

Отримання числової моделі об'єкта полягає в проведенні за допомогою комп'ютера і відповідного програмного забезпечення, розрахунків, пов'язаних з:

- визначенням геометричних параметрів замінюючих поверхонь і ліній номінальної (ідеальної) форми, що представляють реальні поверхні і лінії отвору;
- визначенням геометричних параметрів елементів, що є похідними по відношенню до вихідних замінюючих елементів; їх перетинів, проекцій на задану координатну площину, елементів симетрії, елементів, які об'єднують множину вихідних замінюючих елементів;

- визначенням відстаней і кутів між елементами і визначенням відхилень розмірів, форми і розташування поверхонь і ліній, а також сумарних відхилень форми і розташування.

1.2.2 Оптичний метод

Оптичний метод контролю заснований на використанні явищ відбивання, поглинання, поляризації, інтерференції і дифракції світла, що виявляються в результаті його взаємодії з контрольованим об'єктом при отриманні інформації про стан об'єкта і його параметрів.

При виготовленні виробів застосовуються різні матеріали, які по різному взаємодіють з оптичним випромінюванням.

Ця взаємодія визначається властивостями матеріалів, їх геометрією, зовнішніми умовами, а також параметрами оптичного випромінювання. Даний метод застосовують для вимірювання геометричних параметрів виробів, контролю стану поверхні і виявлення поверхневих дефектів.

Оптичні методи мають дуже широке застосування завдяки великій різноманітності способів отримання первинної інформації. Можливе їхнє застосування для зовнішнього контролю незалежно від матеріалу об'єкта, тому їх застосовують на різних стадіях виробництва.

1.2.2.1 Метод світлової мікроскопії

Мікроскопи призначені для спостереження близько розташованих об'єктів. Робочі мікроскопи, що використовуються в цехах, мають порядку 40-кратне збільшення, поле зору близько 5 mm. Їх застосовують при контролі поверхонь з покриттями, пофарбованих і полірованих поверхонь.

Вимірювальні мікроскопи використовуються в машинобудуванні для точних вимірювань лінійних розмірів контрольованого об'єкта.

Формуванню зображення в світловому мікроскопі супроводжують два ефекти, що знижують роздільну здатність: спочатку дифракція світла на мікроскопічних деталях об'єкта, а потім, після проходження дифрагованих променів через лінзу, їх інтерференція. Ці ефекти не дозволяють вивчати мікрооб'єкти розміром менше 10^{-6} м.

Щоб вивчати менші мікрооб'єкти застосовують метод "темного поля" (рис. 1.2). Його принцип полягає в тому, що досліджуваний прозорий об'єкт висвітлюється променями під кутом, котрі за відсутності розсіювання або заломлення не потрапляють в об'єктив мікроскопа. Якщо ж об'єкт дослідження містить включення, також прозорі, але з іншим показником заломлення, то промені, що пройшли через ці включення і змінили свій напрямок, потрапляють в об'єктив. Таким чином, заломлені промені відображають місця утворення включень.

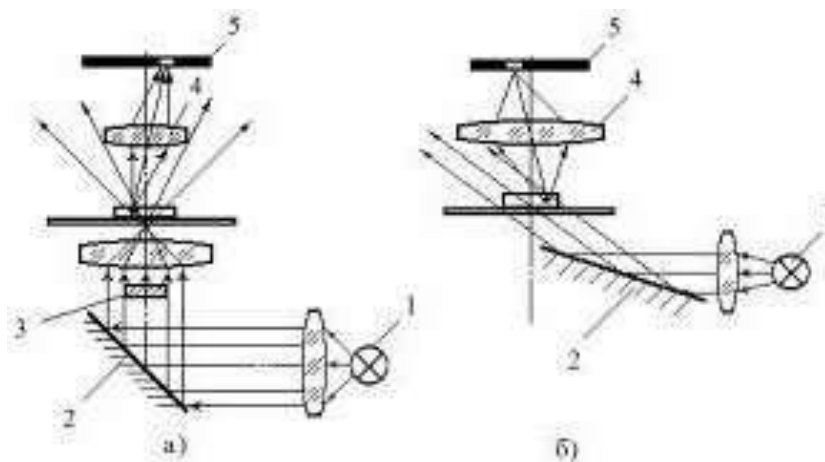


Рисунок 1.2 – Утворення темнопольного зображення ((а) за прямого освітлення та (б) за освітлення під кутом до об'єкта: 1 – освітлювач; 2 – дзеркало; 3 – затемнююча пластина; 4 – об'єктив; 5 – зображення світлого дефекту на темному полі)

До цього часу, для контролю лінійних розмірів, широко використовується візуальний метод та універсальні мікроскопи, які не мають ані необхідної точності, ані необхідної продуктивності. При цьому, як правило, відсутня автоматизація процесу і документування результатів вимірювань.

Візуальний метод може бути вдосконалений, а умови спостережень і вимірювань поліпшені завдяки застосуванню телевізійної та лазерної техніки.

При цьому полегшується робота оператора, знижується його стомлюваність, можливість появи промахів та грубих помилок у вимірах, підвищується продуктивність праці, що завжди важливо у виробничому контролі. Проте точність візуального методу залишається невисокою.

Телевізійні мікроскопи для візуальних вимірювань і контролю фактично представляють собою просте сполучення звичайного оптичного мікроскопа з телевізійною установкою, де зображення розглядає оператор не через окуляр, а на екрані монітора.

У ряді випадків, у виробничому контролі, використання таких мікроскопів замість оптичних має переваги, наприклад, за досить високої загальної освітленості виробничого приміщення. При цьому стомлюваність оператора при спостереженні і вимірах з використанням монітора значно нижче, так як не потрібна постійна акомодация зору, можуть бути підібрані оптимальні яскравість і контраст зображення – за рахунок спеціальної обробки відеосигналу (фільтрація постійної складової, корекція чіткості і т.д.).

За допомогою мікроскопів та пристроїв, побудованих на їх основі, вирішуються такі завдання оптичного контролю [2]:

- вимірювання геометричних розмірів і дотримання форми малогабаритних виробів;
- виявлення дефектів малих розмірів (до долей мікрметрів) з високою роздільною здатністю за їхнім просторовим положенням;
- контроль фізико-механічних властивостей і стану матеріалів (внутрішніх напружень) за їхніми оптичними характеристиками (за показником заломлення і зміни поляризації світла);
- контроль внутрішньої будови малогабаритних виробів або їхніх частин, розташованих в прозорому або напівпрозорому матеріалі.

Але ці методи мають недоліки, зокрема, суттєві обмеження розмірів контрольованих об'єктів, що обмежує область їхнього застосування.

1.2.2.2 Проекційний метод

Дедалі більшого поширення в оптичному контролі отримують проекційні прилади, які створюють збільшене зображення об'єкта контролю та еталонного зразка. Їх використовують для контролю різьбових деталей, зубчастих коліс, турбінних лопаток тощо. Існують два види проекцій: за проходженням та відображенням променів (епі- і діа- проекція). Як матеріали екранів використовуються матове скло, лавсанові плівки тощо.

Існує кілька оптичних схем побудови проекторів. На рис. 1.3 наведена схема проектора подібного збільшення.

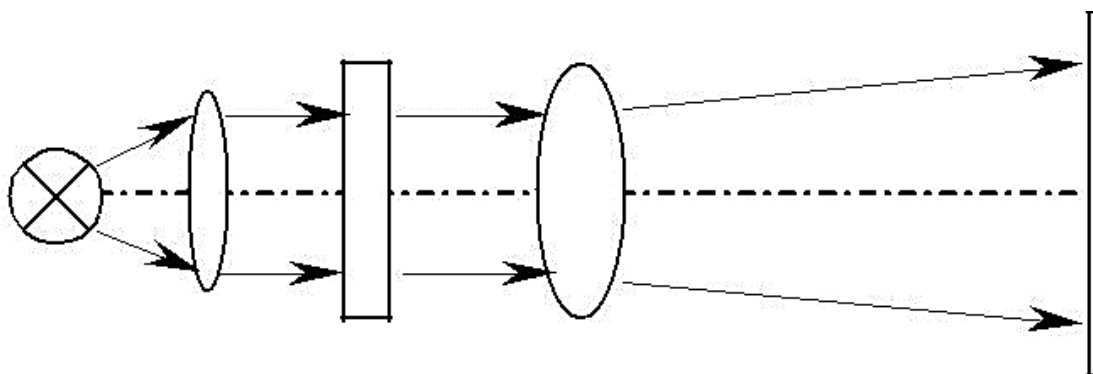


Рисунок 1.3 – Оптична схема проектора подібного збільшення

Проектори подібного збільшення найбільш поширені в оптичному контролі. Вони використовуються для контролю готових виробів і виробів в процесі їх виготовлення. При цьому контролюються геометричні розміри і якість обробки деталей. Контроль здійснюється шляхом поєднання зображення об'єкта, що контролюється, з намальованим на екрані зображенням еталонного зразка.

На рис. 1.4 показаний інший варіант схеми контролю геометричних параметрів деталі. Контрольована деталь встановлюється на вимірювальній позиції так, щоб її вісь симетрії була сумісна з площиною наведення об'єктива. Світловий потік через об'єктив проектує тіньове зображення деталі площини. У цій площині розміщені позиційно-чутливі фотоприймачі.

При підготовці схеми до роботи вихідні сигнали з фотоприймачів приводяться у відповідність зі значеннями контрольованих розмірів і потім, за співвід-

ношенням встановлених і фактичних сигналів, приймаються рішення про придатність об'єкта (деталі).

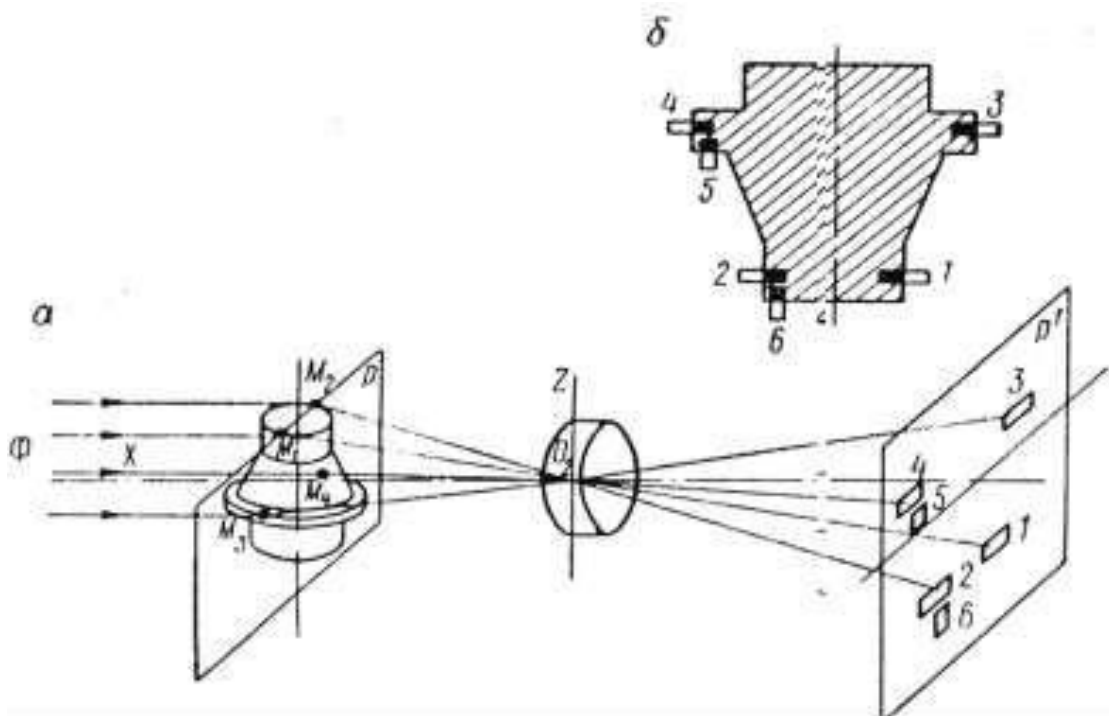


Рисунок 1.4 – Тіньовий спосіб контролю геометричних параметрів деталі

Вимірювальна інформація по даній схемі передається рівнем освітленості на фотоприймачах. Зі зміною того чи іншого розміру зменшується або збільшується площа перекриття відповідних фотоприймачів тіньовим зображенням об'єкта контролю.

Похибки контролю за даною схемою викликають сторонні засвічення, дифракція, коливання світлового потоку, помилки базування.

Для обох варіантів схем контролю деталі ймовірність пропуску браку або невірної браковки не перевищує 3 – 5%, як установлено з досвіду їх експлуатації. Розглянуті схеми контролю призначені для конкретної деталі, але за таким же принципом будуються системи для будь-яких інших поєднань лінійних розмірів, що задаються в загальній площині, перпендикулярній до оптичної осі об'єктива. Тобто, таким же чином можуть контролюватись лінійні розміри отворів.

1.2.2.3 Скануючий метод

На сучасних виробництвах для контролю розмірів деталей типу «тіла обертання» застосовуються стаціонарні вимірювальні системи скануючого типу (рис. 1.5). Деталь встановлюється в станцію і сканується оптичною системою. Скануюча голівка (з моторизованим переміщенням по всіх осях) проектує плоский, лазерний світловий промінь на поверхню об'єкта. Відображення від об'єкта сканується камерою. Результатом сканування є дані у вигляді «хмари точок». «Хмара точок» може складатися з декількох тисяч точок і використовується для контролю розмірів. Однотипні деталі вимірюються по одній програмі з формуванням протоколу вимірювання.



Рисунок 1.5 – Стаціонарні вимірювальні системи скануючого типу

Існує можливість поєднувати різні вимірювальні функції в залежності від заданої програми вимірювань.

Подібні системи застосовуються для вимірів лінійних розмірів, форми і взаємного розташування поверхонь деталей, а також форми поверхонь обертання складного профілю. Область застосування – цехи і вимірювальні лабораторії підприємств загального машинобудування, автомобільної, авіаційної, енергетичної, гірничої та інших галузей промисловості.

1.2.3 Оптико-електронний метод

На даний час існують технічні засоби здатні поєднувати в собі оптичний тракт передачі, електронну складову для прийому інформації та робити її подальшу обробку. Найбільш перспективними в даному напрямку є системи технічного зору.

Промислові системи технічного зору (машинного зору) – це системи, які можуть здійснювати виявлення, стеження і класифікацію об'єктів, що дозволяє замінити людину в області операцій контролю на виробництві.

Промислові системи технічного зору дозволяють проводити безконтактні вимірювання геометричних розмірів деталей і готової продукції в процесі виробництва безпосередньо на конвеєрі або у виробничій лінії на основі отриманого зображення, ведення статистики, а також збереження і видачу результатів роботи за заданий період.

Отримання зображення об'єкта забезпечується камерами в поєднанні з оптичними елементами і пристроями освітлення. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення проводиться комп'ютерна обробка зображення і аналіз, на основі якого автоматично робиться висновок про придатність/непридатність виробу або формується звіт про результати дослідження об'єкта в зручній для сприйняття людиною формі

CCD-камери – камери в основі яких CCD-матриця (скор. з англ. CCD, «Charge-Coupled Device») – спеціалізована аналогова інтегральна мікросхема, що складається з світлочутливих світлодіодів, виконана на основі кремнію, що використовує технологію ПЗЗ – пристроїв із зарядовим зв'язком. CCD-матриці забезпечують нижчий рівень шуму. Також відеокамери CCD мають високий динамічний діапазон (чутливість). Тому у камер CCD рідше виникають труднощі зі зменшенням завад і збільшенням чутливості.

CMOS-камери – камери, що побудовані на світлочутливій матриці, що, в свою чергу, побудована на основі технології (скор. з англ. CMOS, «Complementary Metal-Oxide-Semiconductor»), комплементарна структура метал-оксид-

напівпровідник). Камери на основі технології CMOS споживають менше енергії (майже в 100 разів у порівнянні з CCD камерами). CMOS камери простіші у виробництві, отже і коштують дешевше в порівнянні з камерами із CCD матрицею. Ще одна перевага технології CMOS – це інтеграція різних процесів в одному чипі, що веде до мініатюризації пристроїв. До недоліків CMOS камер можна віднести низький коефіцієнт заповнення пікселів, що знижує їх чутливість. Тому у камер на основі CMOS-матриць частіше виникають труднощі зі зменшенням завад і збільшенням чутливості, тобто з якістю одержуваного зображення.

Промислові камери, як правило, є більш міцними в порівнянні зі звичайними цифровими фотоапаратами. Перш за все, вони повинні відмінно справлятися з зовнішніми впливами, наприклад, забезпечувати бездоганну роботу при високій температурі навколишнього середовища.

Камери з вбудованим процесором («розумні» камери) – камери, що мають свою обчислювальну потужність. Це усуває необхідність в зовнішньому комп'ютері, що дозволяє знизити вартість і складність системи.

Спеціальні камери – вузькоспеціалізовані камери, які, як правило, мають гранично спрощену конструкцію і мініатюрні габарити (наприклад медичні відеокамери, камери відеоспостереження).

Залежно від специфіки завдання, можлива установка однієї або декількох камер. Застосування такого обладнання дозволяє створювати високоефективні рішення для широкого кола галузей промисловості і досліджень: енергетики, металургії, нафтогазової галузі, деревообробки, машинобудування, харчової та фармацевтичної промисловості.

За допомогою типової системи машинного зору, що включає в себе чорно-білу або кольорову камеру, може бути організований комбінований вихідний контроль якості: вимірювання, перевірка відсутності зовнішніх пошкоджень, наявності маркування тощо.

Технологія технічного зору дозволяє замінити людину на операціях контролю продукції. Виключивши «людський фактор», забезпечується істотне поліпшення якості продукції, підвищення продуктивності і зниження браку.

Промислові системи машинного зору дозволяють повністю автоматизувати контроль деталей в процесі виробництва. Невід’ємною частиною систем машинного зору є оптичні компоненти, що забезпечують передачу інформації.

Якість зображення системи технічного зору, в основному, визначається характеристиками елементів, що становлять тракт: об’єktiv – камера – лінія передачі. Оптична система повинна бути збалансована, коли кожен компонент системи відповідає обраному класу якості.

Найбільш часто в оптико-електронних системах застосовують нормальні і ширококутні об’єktivи, що складаються з 2–6 оптичних елементів, фокусна відстань від 6 до 25 mm.

У найбільш загальному вигляді схема отримання та обробки вимірювальної інформації [3] може бути представлена структурною схемою, що представлена на рис. 1.6.

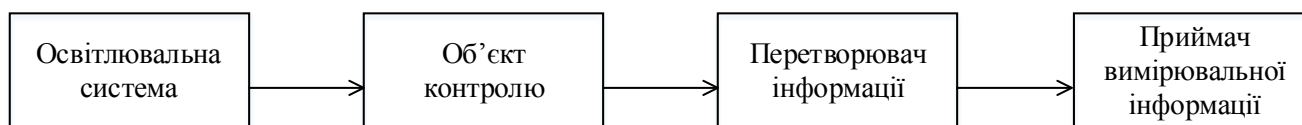


Рисунок 1.6 – Узагальнена схема отримання інформації в оптико-електронних системах

Освітлювальна система призначена для створення світлового потоку, який дозволяє освітити об’єкт так, щоб наступні елементи гранично точно виконували свої функції.

Носієм вихідної інформації є сам об’єкт вимірювання.

Особливість оптичних безконтактних способів вимірювання полягає в тому, що безпосередні вимірювання проводяться не на об’єкті, а на його оптичному зображенні. Зображення повинно передавати інформацію про розмір в такому вигляді, який забезпечує її зчитування із заданою точністю. Для цього необхідно дотримати ряд умов: виділення точок вимірювання на зображенні, фіксація взаємного положення об’єкту і вимірювальної системи, зберігання умов передачі інформації при зміні об’єкта вимірювання.

Оптична система, як перетворювач вимірювальної інформації, функціонує в умовах, що відрізняються від тих, які розглядаються в класичній теорії оптотехніки. У найзагальнішому сенсі оптична система відображає простір предметів, що містить об'єкт, в простір зображень, що містить образ об'єкта. Але в просторі зображень використовується не вся передана інформація, а та її частина, яка необхідна для конкретних вимірювань. Таким чином, оптична система будується з урахуванням конкретних умов вимірювання та вимог, що впливають з цих умов.

Оптичне перетворення вимірювальної інформації і зчитування її в просторі зображень є послідовністю операцій, що розрізняються фізичними принципами їх виконання, способами конструктивної реалізації і характером впливу на передану інформацію.

Операції перетворення інформації, в найбільш простому випадку, можуть виконуватися одним елементом. У більш складних випадках для кожної з них вводяться спеціальні функціональні елементи.

Вихідний сигнал є функцією декількох параметрів: освітленості, площі перекриття, чутливості фотоприймача.

Нерівномірність чутливості фотоприймача в межах робочої зони залежить від технологічних факторів при його виготовленні і є індивідуальним для кожного окремого елемента. Критерієм вибору фотоприймачів є відповідність фізичних і конструктивних параметрів фотоприймача умовам індикації.

1.3 Аналіз існуючих вимірювачів та приклади застосування

Розглянемо існуючі засоби для вимірювання геометричних параметрів отворів.

1.3.1 Оптичний вимірювач геометричних розмірів прозорих тіл

В даному вимірювачі цифрове еталонне зображення об'єкта вводять в обчислювач за допомогою засобів автоматизованого проектування. Цифрове зображення вимірюваного виробу отримують на основі цифрової голограми, що формується на приладі із зарядовим зв'язком когерентними пучками світла, відбитими від вимірюваного виробу і дзеркала. Цифрову голограму вводять в обчислювач, в якому за допомогою дискретного двовимірного Фур'є-перетворення голограму перетворюють в цифрове зображення вимірюваного тіла. Структурна схема вимірювача представлена на рис. 1.7 [4].

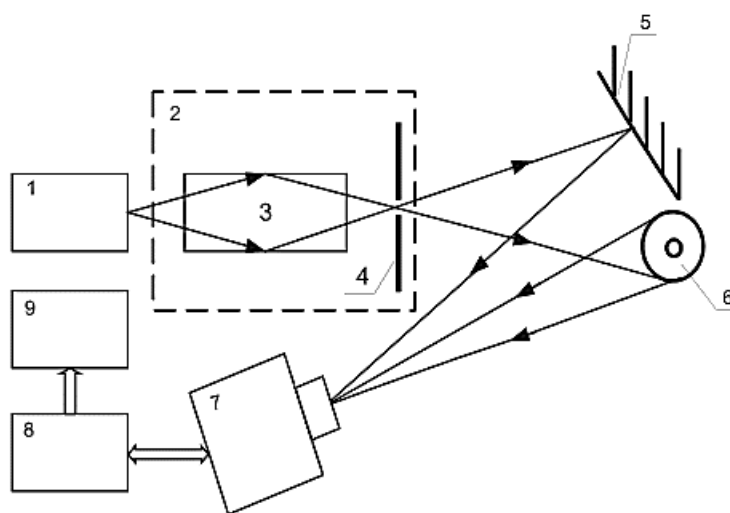


Рисунок 1.7 – Структурна схема оптичного вимірювача геометричних розмірів прозорих тіл

Робота вимірювача здійснюється наступним чином. Пучок світлової енергії з джерела когерентного випромінювання (1), наприклад, напівпровідникового лазера HL6548FG, направляють на вхід фокусуючого градану (3), на виході якого в

фокусній площині встановлюються діафрагми (4). Для отримання якісної голограми промінь, повинен бути розбіжним, чистим, однорідним і когерентним. Необхідні когерентність і однорідність забезпечує напівпровідниковий лазер, а решту необхідних параметрів променя забезпечує просторовий фільтр (2). Сформованим променем одночасно висвітлюють дзеркало (5) і вимірюваний об'єкт (6), від яких відбиваються, відповідно, опорна і об'єктна хвилі. Ці хвилі приходять на цифрову ПЗЗ-камеру (7), на ПЗЗ-матриці якої формується цифрова голограма. Отриману голограму об'єкта передають по цифровому каналу в обчислювач (8). В обчислювачі за допомогою дискретного двовимірного Фур'є-перетворення отримують цифрове зображення вимірюваного об'єкта.

Остаточне значення масштабу отримують шляхом порівняння зображення об'єкта з цифровим еталоном. Після масштабування всі розміри об'єкта приймають розмірність зображення еталона, розміри якого відомі. Величину лінійних розмірів прозорого тіла визначають програмним шляхом.

1.3.2 Вимірювання геометричних параметрів отворів сит

Один з основних і найбільш ефективних способів видалення забруднень із сипучих матеріалів (наприклад, розділення порід) є просіювання. Сита, що застосовуються при цьому мусять мати чітко визначені лінійні розміри отворів. Відповідно, необхідні методи контролю розмірів отворів у ситах.

При контролі розмірів сит, призначених для просіювання матеріалу малих розмірів часто застосовуються оптичні та оптико-електронні методи. На рис. 1.8 наведений приклад вимірювання лінійних розмірів отворів у промисловому ситі оптико-електронним методом.

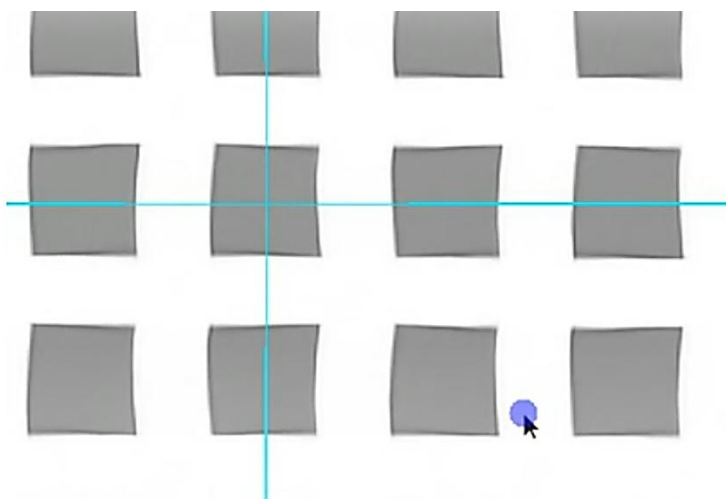


Рисунок 1.8 – Вимірювання розмірів отворів сита оптико-електронним методом (кольори інвертовані)

1.4 Висновки

В даному розділі був проведений аналіз методів вимірювання геометричних параметрів отворів по їх зображенню та визначені основні галузі, де застосовуються подібні вимірювання. Була виділена група вимірювання лінійних розмірів (діаметри, довжини, ширини та ін.).

Був проведений аналітичний огляд методів вимірювання геометричних параметрів отворів, серед яких:

- координатний;
- оптичний;
- оптико-електронний.

Аналіз існуючих вимірювачів та прикладів вимірювання геометричних параметрів отворів показав, що доцільне застосування оптико-електронного методу для вирішення задачі вимірювання геометричних параметрів отворів по їх зображенню. Необхідно провести додаткові теоретичні дослідження особливостей отримання вимірювальної інформації оптико-електронним методом. Провести

аналіз похибок, що впливають на точність одержуваної інформації, таким чином, визначена область досліджень і основні завдання дисертаційної роботи:

- 1) Провести аналіз процесу отримання інформації оптико-електронним методом.
- 2) Проаналізувати існуючі похибки та методи покращення цих похибок в оптико-електронних системах
- 3) Розробити систему вимірювання геометричних параметрів отворів по їх зображенню з підвищеними метрологічними характеристиками
- 4) Провести аналіз метрологічних характеристик розробленої системи вимірювання геометричних параметрів отворів по їх зображенню.

Основним елементом у випадку застосування оптико-електронного методу є фото- або відео- камера (далі – камера). Слід зазначити, що параметри камери, як оптичного блоку, вносять суттєві похибки, які важко врахувати звичайними методами. Тому виникає необхідність калібрування камери, як одного з основних елементів при визначенні розмірів отворів за їхніми зображеннями. У 3-ому розділі проведено огляд алгоритмів калібрування камери.

2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ

Оскільки на сучасному обладнанні визначення геометричних розмірів отворів переважно здійснюються за їхніми цифровими зображеннями, то суттєве значення має вибір програмного забезпечення для обробки цих зображень.

Мова програмування, що може бути застосована для цього, суттєво залежить від апаратної частини. Програма обробки може виконуватись бути написана на будь-якій мові програмування, наприклад: C, C++, Python, MATLAB тощо.

Достатньо широко зараз використовуються прикладні програмні пакети, що дозволяють реалізовувати складні програми широкому колу користувачів та не потребують глибинних знань з програмування. При застосуванні таких спеціалізованих програмних пакетів є можливість застосовувати, розроблені у них, програмні блоки високого ступеня інтегрованості. В якості прикладу можна навести: Simulink та LabVIEW.

В останні роки найбільшого поширення набула мова програмування Python, як мова загального призначення. Та особливою популярністю мова користується у задачах обробки великих об'ємів даних, машинного навчання та комп'ютерного зору. Серед спеціалізованих програмних пакетів стабільно тримає місце графічне середовище розробки додатків LabVIEW. Розглянемо ці рішення детальніше.

2.1 Мова програмування Python

Python – інтерпретована об'єктно-орієнтована мова програмування загального призначення зі строгою динамічною типізацією. Високорівневий підхід робить цю мову привабливою для швидкої розробки програм. Python підтримує модулі та пакети модулів, що сприяє модульності та повторному використанню коду. В мові програмування Python підтримується кілька парадигм програмування,

зокрема: об'єктно-орієнтована, процедурна, функціональна та аспектно-орієнтована.

Python має ефективні структури даних високого рівня та простий, але ефективний підхід до об'єктно-орієнтованого програмування. Синтаксис Python, динамічна обробка типів, а також те, що це інтерпретована мова, роблять її ідеальною для написання скриптів та швидкої розробки прикладних програм у багатьох галузях на більшості платформ.

Інтерпретатор мови Python може бути розширений функціями та типами даних, розробленими на C чи C++.

Python портований і працює майже на всіх відомих платформах — від КПК до мейнфреймів. Існують порти під Microsoft Windows, всі варіанти UNIX (включаючи BSD та GNU/Linux), Mac OS, iPhone OS, Palm OS, OS/2, Android та ін.

Python підтримує динамічну типізацію. З базових типів слід зазначити підтримку цілих чисел довільної довжини і комплексних чисел. Python має багату бібліотеку для роботи з рядками.

З колекцій Python підтримує кортежі, списки, словники (асоціативні масиви) та множини. Додаткові типи можуть бути отримані із вбудованих модулів.

Система класів підтримує множинне успадкування і метапрограмування. Будь-який тип, включаючи базові, входить до системи класів, й за необхідності можливе успадкування навіть від базових типів.

Програмне забезпечення (застосунок або бібліотека) на Python оформлюється у вигляді модулів, які у свою чергу можуть бути зібрані в пакунки. Модулі можуть бути двох типів за своїм походженням: модулі, написані на «чистому» Python, і модулі розширення (extension modules), написані на інших мовах програмування, наприклад, C++. Модуль оформляється у вигляді окремого файлу, а пакет — у вигляді окремого каталогу.

Python підтримує повну інтроспекцію виконання. Це означає, що для будь-якого об'єкта можна отримати всю інформацію про його внутрішню структуру.

Багата стандартна бібліотека є однією з привабливих сторін Python. Тут є засоби для роботи з багатьма мережевими протоколами та форматами Інтернету,

наприклад, модулі для написання HTTP-серверів та клієнтів, для розбору та створення поштових повідомлень, для роботи з XML, JSON тощо. Набір модулів для роботи з операційною системою дозволяє писати крос-платформні застосунки. Існують модулі для роботи з регулярними виразами, текстовими кодуваннями, мультимедійними форматами, криптографічними протоколами, архівами, серіалізацією даних, тестуванням та ін.

Крім стандартної бібліотеки існує багато інших, що надають інтерфейс до всіх системних викликів на різних платформах; зокрема, на платформі Win32 підтримуються всі виклики Win32 API. Існує велика кількість прикладних бібліотек для Python у різноманітних галузях: веб-розробка, бази даних, обробка зображень, обробка тексту, чисельні методи, програми операційної системи тощо.

Для Python прийнята специфікація програмного інтерфейсу до баз даних DB-API 2 та розроблено відповідні цій специфікації пакети для доступу до різних СУБД: PostgreSQL, Oracle, Sybase, Firebird Interbase), Informix, Microsoft SQL Server, MySQL та sqlite. На платформі Microsoft Windows доступ до БД можливий через ADO(ADOdb). Комерційний пакет mxODBC для доступу до СУБД через ODBC для платформ Windows і UNIX розроблений eGenix. Для Python написано багато ORM: (SQLObject, SQLAlchemy, Dejavu, Django), виконані програмні каркаси для розробки веб-застосунків (Django, Pylons).

Основною перевагою Python на сьогодні є велика кількість відкритого програмного забезпечення для різних додатків. Для цілей нашої роботи може застосовуватися відкрита бібліотека програм комп'ютерного зору OpenCV.

OpenCV – бібліотека функцій та алгоритмів комп'ютерного зору, обробки зображень і чисельних алгоритмів загального призначення з відкритим кодом. Бібліотека надає засоби для обробки і аналізу вмісту зображень, у тому числі розпізнавання об'єктів на фотографіях (наприклад, осіб і фігур людей, тексту тощо), відстеження руху об'єктів, перетворення зображень, застосування методів машинного навчання і виявлення загальних елементів на різних зображеннях.

2.2 Програмне середовище LabVIEW

LabVIEW – платформа та середовище розробки для візуальної мови програмування компанії National Instruments (США). Метою даної мови є автоматизація використання обчислювального та вимірювального лабораторного обладнання. Існують версії для Windows, Linux, MacOS.

Розробка програми в LabVIEW відбувається одночасно в двох вікнах: блок-діаграма та лицева панель. На лицевій панелі створюється графічний інтерфейс програми і паралельно ведеться зв'язка інтерфейсу з власне програмою, яка створюється за допомогою спеціальних блоків. Таким чином графічний код програми має вигляд специфічної блок-діаграми.

Виконання програми у LabView визначається структурою блок-діаграми при створенні якої програміст з'єднує різноманітні вузли-функції з'єднувальними лініями. Таким чином створюється потік даних (data flow). Лініями передаються змінні і вузол виконує свою роботу, як тільки усі необхідні дані будуть доступні на його входах. Таким чином виконання програми на непов'язаних один з одним вузлах може йти паралельно.

При розробці LabVIEW-програми, розробник також створює графічний інтерфейс, що представлений на фронтальній панелі. Програму в LabView в цілому називають віртуальним інструментом (Virtual Instrument; VI). Кожен VI складається з двох основних вікон: блок-діаграми та лицевої (фронтальної) панелі. Також в блок-діаграму можуть вбудовуватись сполучні панелі (Connector Pane), за допомогою яких утворюються підпрограми (SubVI), які можуть створюватись з уже готових віртуальних інструментів (VI). Елементи управління та індикатори на лицевій панелі дозволяють оператору здійснювати ввід/вивід даних при роботі з віртуальним інструментом, а також використовуються при зневадженні підпрограм.

LabVIEW включає ряд готових програм, документацію, а також велику кількість інструментів для створення практично повноцінних програм різноманіт-

ного призначення, в тому числі і мережевих, які працюють по технології клієнт/сервер.

Основною перевагою LabVIEW є те, що він дозволяє здійснювати доступ до великої кількості приладів через вбудовані драйвери. Спрощує програмування для непрофесійних програмістів. До ряду приладів, зокрема, розроблених National Instruments, уже надаються готові віртуальні інструменти. Програми є незалежними від платформи оскільки виконуються в спеціальному виконавчому середовищі (runtime). Наявна велика кількість функцій для збору даних, обчислень, генерації сигналів, аналізу тощо. Також, наявна велика кількість графічних елементів для реалізації зручного інтерфейсу користувача. В LabVIEW наявний додатковий програмно-текстовий компонент для проведення обчислень – MathScript.

LabVIEW, в принципі, універсальна мова програмування. І хоча цей продукт часом тісно пов'язаний з апаратним забезпеченням National Instruments, він, тим не менш, не пов'язаний з конкретною машиною. Код, згенерований LabVIEW також може бути також виконаний на Windows Mobile або PalmOS. Ця мова може успішно використовуватися для створення великих систем, для обробки текстів, зображень і роботи з базами даних.

LabVIEW – високорівнева мова. Однак, ніщо не заважає включати низькорівневі модулі в LabVIEW-програми. З іншого боку, високорівневність дозволяє за просто робити нетривіальні операції з даними. Втім варто зазначити, що деякі операції низькорівневих мов (наприклад, роботу з вказівниками), не так просто реалізувати в LabVIEW зважаючи на те, що програма виконуватиметься у runtime-середовищі.

Одним з додаткових компонентів LabVIEW є модуль IMAQ Vision, що спрощує роботу у задачах обробки зображень, містячи в собі як численні алгоритми обробки, так і специфічні блоки захоплення окремих зображень або відеопотоку із цифрових камер. Рис. 2.1 демонструє меню вибору блоків IMAQ Vision.

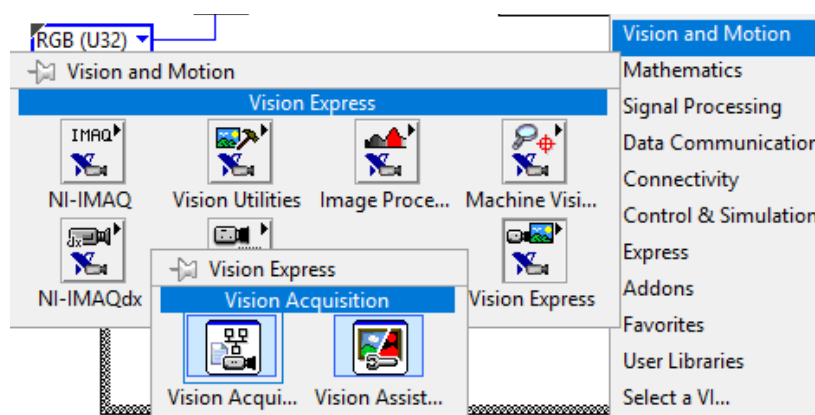
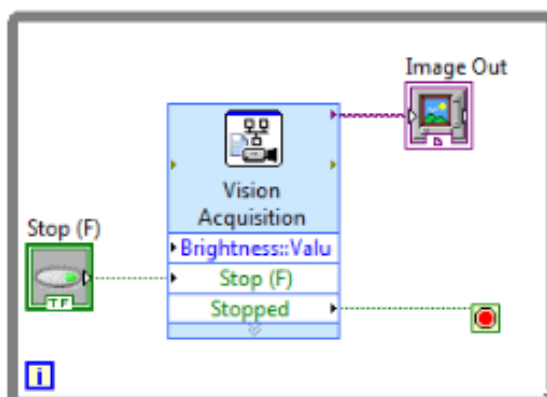
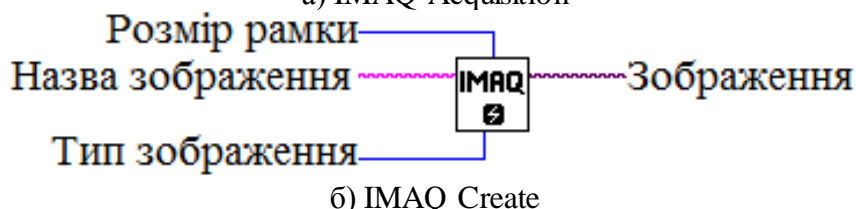


Рисунок 2.1 – Блоки IMAQ Vision

За допомогою блоків IMAQ Acquisition та Create (рис. 2.2) можна відповідно захопити зображення з камери та зчитати його з файлу.



а) IMAQ Acquisition



б) IMAQ Create

Рисунок 2.2 – Блоки отримання зображень

2.3 Висновки

У цьому розділі був проведений огляд існуючих програмних рішень, що можуть бути застосовані для вирішення задачі вимірювання геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню.

Перевагою Python є простота написання коду та наявність бібліотеки готових програм для систем комп'ютерного зору OpenCV, що є потужним інструментом для програмної обробки зображень.

Перевагою використання LabVIEW є простота створення програми, а також те, що програма являє собою віртуальний макет приладу. Також перевагою LabVIEW є простота взаємодії програмних засобів (віртуального приладу) з реальним обладнанням. В LabVIEW є готові блоки підключення цифрових фото та відео камер, цифрової фільтрації, позиціонування, виділення границь об'єктів тощо.

Таким чином, у даній задачі, обираємо середовище графічного програмування LabVIEW.

3 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ КАЛІБРУВАННЯ

3.1 Калібрування камери за допомогою об'єктива зі змінною фокусною відстанню

Розглянемо варіант калібрування камери за допомогою об'єктива зі змінною фокусною відстанню.

Використаємо поняття фрейму під яким будемо розуміти множину зображень, отриманих за однієї фокусної відстані.

Розглянемо камеру, що оснащена об'єктивом зі змінною фокусною відстанню. Камера виконує послідовну зйомку сцени, що дозволить розглянути підпоследовність фреймів N і $N+1$. Зробимо такі припущення щодо камери і зображень:

- оптичний центр камери постійний незалежно від зображень і фреймів;
- камера може обертатися, але зображення фреймів N і $N+1$ повинні в достатній мірі перекривати один одного для встановлення відповідності між точками;
- оптичне викривлення видалено з обох зображень;
- внутрішні параметри камери відомі для зображення фрейму N .

Ці умови дозволять нам вирішити рівняння, що описують варіацію фокальної лінзи між зображеннями фреймів N і $N+1$.

Працюватимемо в системі координат камери (стандартна координатна система). Перспективна проекція матриці P моделюється за допомогою чотирьох внутрішніх параметрів:

$$K = \begin{bmatrix} -\alpha_u & \gamma & u_0 \\ 0 & -\alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

де u_0 , v_0 – координати центральної точки; α_u , α_v – скалярні множники для рядків та стовпців відповідно.

Припустимо, що $\alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0$ – відомі внутрішні параметри для зображення фрейму N. Зауважимо, що α_u, α_v – лінійні функції фокальної лінзи, параметри $\alpha'_u, \alpha'_v, u'_0, v'_0$ рамки N+1 визначені як:

$$\{f' = \mu f\} \Rightarrow \{\alpha'_u = \mu \alpha_u, \alpha'_v = \mu \alpha_v, u'_0 = u_0, v'_0 = v_0\}. \quad (3.2)$$

Фокусна відстань f і f' відповідних фреймів N, N+1 і μ – відомі величини. Рівняння оптичного променя $\langle C, a \rangle$ визначено як піксель (точка) a і оптичний центр камери C пов'язані рівнянням:

$$A = \lambda P^{-1} \tilde{a}, \quad (3.3)$$

де $\tilde{a} = [a_1, a_2, 1]$ – однорідний координатний вектор точки a , 3D вектор A визначено як точка на оптичному промені $\langle C, a \rangle$ і λ – зміни від $-\infty$ до $+\infty$.

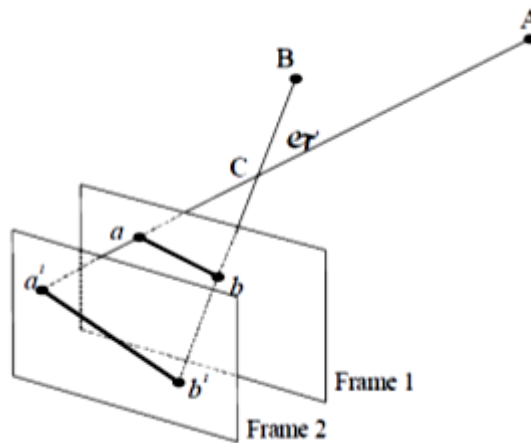


Рисунок 3.1 – Геометрія двох послідовних зображень для камери зі змінним фокусом

Будемо розглядати геометрію двох послідовних зображень, представлену на рисунку 3.1. Виберемо дві A і B у тривимірному просторі на сцені та їхні проєкції на зображення a, a^1 і b, b^1 фреймів N і N+1 відповідно. Кут, визначений оптичними променями $\langle C, a \rangle$ і $\langle C, b \rangle$, і кут, визначений відповідними точками $\langle C, a^1 \rangle$ і $\langle C, b^1 \rangle$, фізично рівні між собою і виражаються наступним рівнянням:

$$\cos \varphi = \left| \frac{A^T B}{|A||B|} \right|, \quad (3.4)$$

де AB – скалярний добуток 3D векторів A і B . Скомбінуючи (3.3) та (3.4) для фреймів N та N+1, отримаємо:

$$\frac{(P_1^{-1}\tilde{a})^T(P_1^{-1}\tilde{b})}{\|P_1^{-1}\tilde{a}\|\|P_1^{-1}\tilde{b}\|} = \frac{(P_2^{-1}\tilde{a}^1)^T(P_2^{-1}\tilde{b}^1)}{\|P_2^{-1}\tilde{a}^1\|\|P_2^{-1}\tilde{b}^1\|}, \quad (3.5)$$

де \tilde{a} , \tilde{a}^1 і \tilde{b} , \tilde{b}^1 – однорідні координати точок зображення a , a^1 і b , b^1 ; P_1 , P_2 – перспективна проекція матриці для фреймів N , $N+1$, що виражені в (3.1). Припустимо, що M в якості значення лівої сторони рівняння (3.15), не містить невідомих змінних. На основі (3.5), використовуючи вирази (3.1) і (3.2) для матриць P_1 і P_2 , маємо:

$$\begin{aligned} & \frac{(u_0 - a_1^1)(u_0 - b_1^1)}{\mu^2 \alpha_u^2} + \frac{(v_0 - a_2^1)(v_0 - b_2^1)}{\mu^2 \alpha_v^2} + 1 = \\ & = M \sqrt{\frac{(u_0 - a_1^1)^2}{\mu^2 \alpha_u^2} + \frac{(v_0 - a_2^1)^2}{\mu^2 \alpha_v^2} + 1} \times \sqrt{\frac{(u_0 - b_1^1)^2}{\mu^2 \alpha_u^2} + \frac{(v_0 - b_2^1)^2}{\mu^2 \alpha_v^2} + 1}. \end{aligned}$$

З цього отримуємо квадратичне рівняння для невідомих $\mu_1 = \mu^2$:

$$\mu_1^2 (1 - M^2) + \mu_1 (2\Delta - M^2(\Delta_1 + \Delta_2)) + \Delta^2 - M\Delta_1\Delta_2 = 0,$$

де

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{(u_0 - a_1^1)(u_0 - b_1^1)}{\alpha_u^2} + \frac{(v_0 - a_2^1)(v_0 - b_2^1)}{\alpha_v^2}; \\ \Delta_1 &= \frac{(u_0 - a_1^1)^2}{\alpha_u^2} + \frac{(v_0 - a_2^1)^2}{\alpha_v^2} \\ \Delta_2 &= \frac{(u_0 - b_1^1)^2}{\alpha_u^2} + \frac{(v_0 - b_2^1)^2}{\alpha_v^2}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Резюмуючи, отримуємо наступну процедуру калібрування для камери зі змінним фокусом:

- 1) Обчислюємо відповідність для пар обраних точок на двох зображеннях фреймів N і $N+1$, отриманих камерою зі змінною фокусною відстанню.
- 2) Записуємо рівняння (3.6) для пар відповідних точок.
- 3) Вирішуємо (3.6) для дійсного позитивного кореня і оновлюємо скаляр α_u , α_v .

3.2 Алгоритм калібрування Хартлі

Наведемо ідею алгоритму, що представлена Річардом Хартлі. Припустимо, у нас дано N зображень, що перекриваються – J_0, J_1, \dots, J_N , де $N \geq 2$. Всі зображення отримані однією і тією ж камерою або декількома камерами з однаковими внутрішніми параметрами.

Основні кроки алгоритму.

- 1) Встановити точкову відповідність між зображеннями.
- 2) Для кожного $j=1, \dots, N$ розрахувати 2D проєкційне перетворення P_j від J_0 до J_j .
- 3) Знайдемо верхньотрикутну матрицю K таку, що $K^{-1}P_jK=R_j$ є матрицею обертання для всіх $j>0$. Матриця K буде калібрувальною матрицею для камер (або камери), а R_j являє собою орієнтацію j -ої камери по відношенню до 0-ї.
- 4) Покращимо розрахункову матрицю, використовуючи ітераційне наближення Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt).

Отже, нам відомі перетворення P_j для $j=1, \dots, N$, і ми бажаємо знайти калібрувальну матрицю K , яка повинна являти собою верхньотрикутну матрицю, що задовольняє умові:

$$K^{-1}P_jK = R_j, \quad (3.7)$$

де R_j – матриця обертання для будь-якого j .

Матриця P повинна бути сполучена до матриці обертання, це означає, що матриця P досить специфічна, як буде показано далі. Зі співвідношень (3.7) і $R=R^T$ випливає:

$$R_j = K^T P_j^{-T} K^{-T}. \quad (3.8)$$

З еквівалентностей (3.7) та (3.8):

$$(KK^T)P_j^{-T} = P_j(KK^T). \quad (3.9)$$

Припустимо

$$C = K K^T = \begin{bmatrix} a & b & c \\ b & d & e \\ c & e & f \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Рівняння (3.10) дає дев'ять лінійних рівнянь з шістьма невідомими. Щоб знайти матрицю C , необхідно знати як мінімум три різні матриці P_j . Зокрема, для кожного зображення і відповідної матриці P_j для $j=1, \dots, N$ буде 9 рівнянь. Цю невизначену систему рівнянь можна записати у вигляді $Xa=0$, де X – матриця розмірністю $9N \times 6$ і вектор a складається з невідомих матриці C . Це проблема мінімізації і вирішується методом найменших квадратів.

Знайшовши матрицю C , матрицю K можна знайти, використовуючи факторизаційний метод Холецкого (Cholesky decomposition). Рішення для матриці K можливо лише при умові позитивно визначеної матриці C .

3.3 Метод епіполярних ліній

Процес калібрування камери проходить в два кроки.

На першому кроці обчислюється зміна епіполярних ліній. Існує два методи розрахунку епіполяр. Один заснований на проєктивних інваріантах, другий – на узагальненні основної матриці.

На другому кроці використовуються так звані рівняння Круппа, які пов'язують епіполярне перетворення із зображенням. Рівняння Круппа можуть бути вирішені після як мінімум трьох переміщень камери. Після цього можна знайти внутрішні параметри камери.

3.4 Алгоритм калібрування Стурма

У статті Пітера Стурма розглядається проблема самокалібрування камери, що рухається, внутрішні параметри якої відомі за винятком фокусної відстані, яка може змінюватися протягом часу спостереження за сценою. Умови, під дією яких визначається значення фокусної відстані для послідовності зображень, не є необхідними. Це залежить тільки від характеру руху камери. Розрахунок фокусної відстані визначається на основі так званих критичних послідовностей руху. Розглянемо послідовність зображень. Припустимо (R_i, t_i) – зовнішні параметри зображення i . Якщо Евклідове перетворення вироджене для послідовності зображень, то можна сказати, що $\{(R_i, t_i) | i=1, \dots, n\}$ є критичною послідовністю руху для перетворення Евкліда.

3.5 Алгоритм калібрування Мендонца і Чіполла

Спільна стаття Пауло Мендонца і Роберто Чіполла знайомить з розширеною технікою самокалібрування Хартлі, заснованої на властивостях основної матриці, що дозволяє стабільно розраховувати фокусну відстань і принципові точки, що змінюються. Відомо, що три сингулярних значення основної матриці повинні задовольняти двом умовам: одне зі значень має бути нульовим, а інші два – ідентичними. Основна ж матриця виходить з фундаментальної матриці шляхом перетворення внутрішніх параметрів пар камер, пов'язаних двома сценами. Таким чином, робота з основною матрицею зводиться до роботи з внутрішніми параметрами пар камер. Це дозволяє шукати простір внутрішніх параметрів камер в порядку мінімізації функції вартості. Цей підхід показує більш простий, ніж інші, метод з близькою точністю результатів. Інша перевага даної техніки в тому, що їй не потрібен послідовний напрямок слабо відкаліброваної матриці камери для всієї послідовності зображень, тобто множини взаємно пов'язаних камер.

3.6 Висновки

В цьому розділі був проведений аналіз алгоритмів калібрування камери за допомогою методів: об'єктиву зі змінною фокусною відстанню, Хартлі, епіполярних ліній, Стурма та Мендонца і Чіполла. Оскільки найбільш простим, але не менш ефективним є алгоритм калібрування за зміною фокусної відстані, то доцільним є застосування саме цього алгоритму.

4 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОХИБОК

За результатами огляду та аналізу існуючих систем вимірювання геометричних розмірів (СВГР) отворів можна зробити висновок, що питання розробки структурної схеми та визначення характеристик окремих блоків розглянуто недостатньо. У зв'язку з чим необхідно розробити структурну схему СВГР.

4.1 Розробка та розрахунок структурної схеми СВГР

Структурна схема системи вимірювання геометричних розмірів (СВГР) наведена на рисунку 4.1.

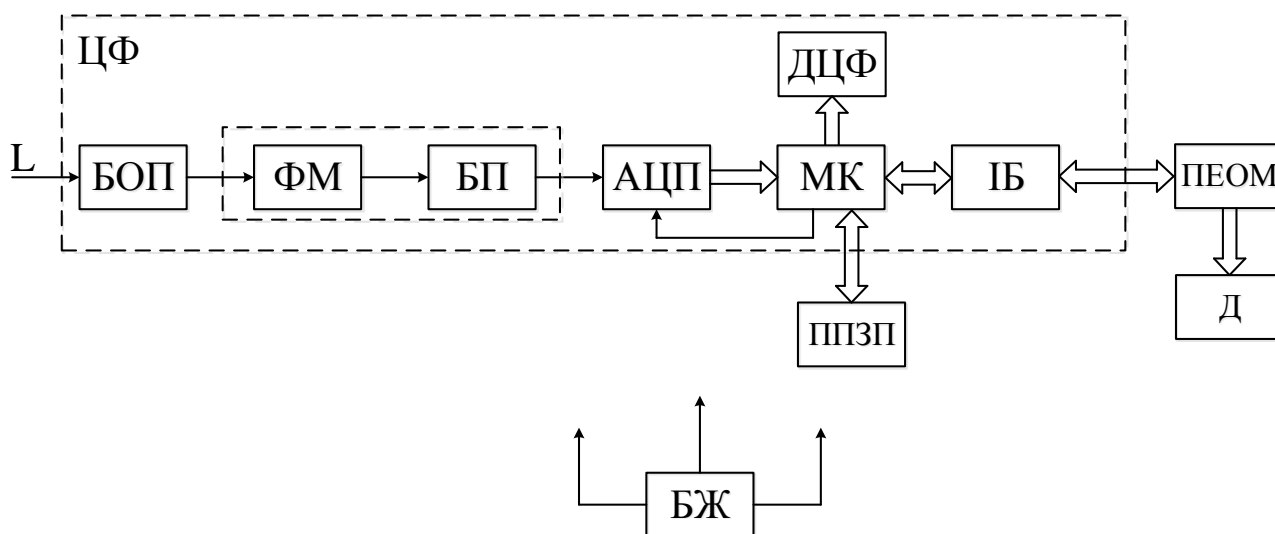


Рисунок 4.1 – Структурна схема СВГР

На рисунку позначені:

- L – дійсне зображення об'єкта вимірювання;
- БОП – блок оптичного перетворення;
- ФМ – фотоматриця;
- БП – буферний підсилювач;

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- МК – мікроконтролер;
- ДЦФ – дисплей цифрової фотокамери;
- ІБ – інтерфейсний блок;
- ЦФ – цифрова фотокамера;
- ППЗП – програмований постійний запам'ятовуючий пристрій;
- ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина;
- Д – дисплей;
- БЖ – блок живлення.

4.1.1 Опис структурної схеми

Структурна схема складається з блоку оптичного перетворення (об'єктив), фотоматриці, буферного підсилювача, аналого-цифрового перетворювача, мікроконтролера, дисплея цифрової фотокамери, інтерфейсного блоку, програмованого постійного запам'ятовуючого пристрою, персональної електронно-обчислювальної машини, дисплея і блока живлення. При застосуванні стандартних засобів блоки БОП, ФМ, БП, АЦП, МК, ДЦФ та ІБ входять до складу ЦФ.

Блок оптичного перетворення призначений для формування зображення об'єкта вимірювання на фотоматриці.

Фотоматриця призначена для перетворення спроектованого на неї оптичного зображення в аналоговий електричний сигнал.

Буферний підсилювач призначений для узгодження за рівнем сигналів між фотоматрицею та АЦП.

Аналого-цифровий перетворювач призначений для перетворення аналогової вимірювальної інформації в цифровий код.

Мікроконтролер призначений для обробки інформації, що надходить з АЦП.

Дисплей цифрової фотокамери призначений для відображення об'єкту зйомки, найбільш важливих установок фотокамери, інформації про залишок доступною пам'яті в ППЗП.

Інтерфейсний блок призначений для зв'язку ЦФ з ПЕОМ.

Персональна електронно-обчислювальна машина призначена для обчислення вимірюваної величини, за допомогою попередньо встановленого програмного забезпечення.

Дисплей призначений для представлення об'єкта, вибору точок вимірювання на ньому та відображення значення вимірюваної величини в цифровій формі, зручній для користувача.

4.1.2 Схема каналу вимірювання та рівняння похибки вимірювання

Схема каналу вимірювання СВГР представлена на рисунку 4.2.

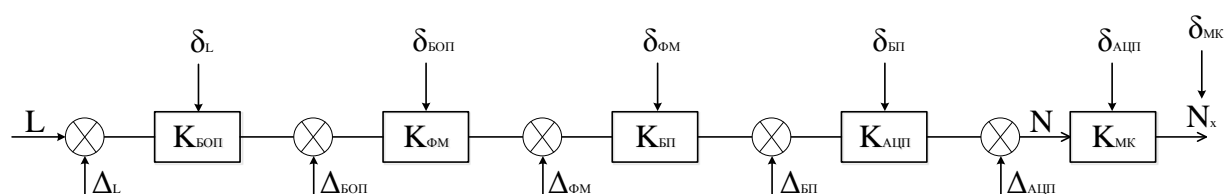


Рисунок 4.2 – Схема каналу вимірювання СВГР

На рисунку позначено: L – дійсне зображення об'єкту вимірювання, що надходить на вхід блока оптичного перетворення; $K_{\text{БОП}}$ – коефіцієнт перетворення БОП; $K_{\text{ФМ}}$ – коефіцієнт перетворення фотоматриці; $K_{\text{БП}}$ – коефіцієнт перетворення буферного підсилювача; $K_{\text{АЦП}}$ – коефіцієнт перетворення аналого-цифрового перетворювача; $K_{\text{МК}}$ – коефіцієнт перетворення мікроконтролера; $\delta_{\text{БОП}}$ – мультиплікативна похибка перетворення блока оптичного перетворення; $\delta_{\text{ФМ}}$ – мультиплікативна похибка фотоматриці; $\delta_{\text{Бу}}$ – мультиплікативна похибка буферного підсилювача; $\delta_{\text{АЦП}}$ – мультиплікативна похибка АЦП; $\delta_{\text{МК}}$ – мультиплікативна похибка розрахунку (МК+ПЕОМ); Δ_L – адитивна похибка позиціонування об'єкта; $\Delta_{\text{БОП}}$ –

адитивна похибка перетворення блока оптичного перетворення; $\Delta_{\text{ФМ}}$ – адитивна похибка фотоматриці; $\Delta_{\text{БУ}}$ – адитивна похибка буферного підсилювача; $\Delta_{\text{АЦП}}$ – адитивна похибка АЦП; $\Delta_{\text{МК}}$ – адитивна похибка розрахунку (МК+ПЕОМ); N – код, що отримується в результаті перетворення в АЦП; N_x – код, що є результатом перетворення.

Рівняння для структурної схеми СВГР має наступний вигляд:

$$N_x = L \cdot K_{\text{БОП}} \cdot K_{\text{ФМ}} \cdot K_{\text{БП}} \cdot K_{\text{АЦП}} \cdot K_{\text{МК}}$$

Рівняння з урахуванням адитивних похибок вимірювання СВГР має вигляд:

$$N_x = (((((L + \Delta_L) K_{\text{БОП}} + \Delta_{\text{БОП}})) K_{\text{ФМ}} + \Delta_{\text{ФМ}}))) K_{\text{БП}} + \Delta_{\text{БП}})) K_{\text{АЦП}} + \Delta_{\text{АЦП}}) K_{\text{МК}} + \Delta_{\text{МК}}$$

Рівняння приведеної адитивної похибки розраховується за формулою [13]:

$$\gamma_A = \sum V_j \cdot \Delta_j,$$

де V_j – коефіцієнт впливу похибок окремих блоків; γ_A – приведена адитивна похибка;

$$V_j = \frac{\partial N_x}{\partial \Delta_j} \cdot \frac{1}{N_{xH}}.$$

Після перетворень рівняння приведеної адитивної похибки вимірювального каналу матиме вигляд:

$$\gamma_A = \frac{\Delta_L}{L} + \frac{\Delta_{\text{БОП}}}{K_{\text{БОП}} \cdot L} + \frac{\Delta_{\text{ФМ}}}{K_{\text{ФМ}} \cdot K_{\text{БОП}} \cdot L} + \frac{\Delta_{\text{БП}}}{K_{\text{БП}} \cdot K_{\text{ФМ}} \cdot K_{\text{БОП}} \cdot L} +$$

$$+ \frac{\Delta_{\text{АЦП}}}{K_{\text{АЦП}} \cdot K_{\text{БП}} \cdot K_{\text{ФМ}} \cdot K_{\text{БОП}} \cdot L} + \frac{\Delta_{\text{МК}}}{K_{\text{МК}} \cdot K_{\text{АЦП}} \cdot K_{\text{БП}} \cdot K_{\text{ФМ}} \cdot K_{\text{БОП}} \cdot L}.$$

Звідси:

$$\gamma_A = \gamma_{\text{БОП}} + \gamma_{\text{ФМ}} + \gamma_{\text{БП}} + \gamma_{\text{АЦП}} + \gamma_{\text{МК}},$$

де $\gamma_{\text{БОП}}$ – приведена адитивна похибка БОП; $\gamma_{\text{ФМ}}$ – приведена адитивна похибка ФМ; $\gamma_{\text{БУ}}$ – приведена адитивна похибка БП; $\gamma_{\text{АЦП}}$ – приведена адитивна похибка АЦП; $\gamma_{\text{МК}}$ – приведена адитивна похибка обчислень.

Рівняння перетворення з урахуванням мультиплікативних похибок вимірювання СВГР має вигляд:

$$N_x (1 + \delta_M) = L \cdot K_{\text{БОП}} (1 + \delta_{\text{БОП}}) \cdot K_{\text{ФМ}} (1 + \delta_{\text{ФМ}}) \cdot K_{\text{БП}} (1 + \delta_{\text{БП}}) \cdot K_{\text{АЦП}} (1 + \delta_{\text{АЦП}}) \cdot K_{\text{МК}} (1 + \delta_{\text{МК}}),$$

де δ_M – сумарна мультиплікативна похибка СВГР;

Рівняння мультиплікативної похибки розраховується за формулою [13]:

$$\delta_M = \sum \psi_i \cdot \delta_i,$$

де ψ_i – коефіцієнти впливу похибок окремих блоків.

$$\psi_i = \frac{\partial K_{\text{П}}}{\partial K_i} \cdot \frac{K_i}{K_{\text{П}}}.$$

Для схеми на рисунку 4.2 всі коефіцієнти впливу рівні одиниці, так як схема лінійна та не має зворотного зв'язку. Тому рівняння мультиплікативної складової похибки набуває вигляду:

$$\delta_M = \delta_{\text{БОП}} + \delta_{\text{ФМ}} + \delta_{\text{БП}} + \delta_{\text{АЦП}} + \delta_{\text{МК}}.$$

Рівняння сумарної відносної похибки СВГР має вигляд:

$$\delta_{\Sigma} = \pm \left[\delta_M + \gamma_A \frac{X_K}{X} \right], \quad \%,$$

де δ_{Σ} – сумарна відносна похибка СВГР; δ_M – сумарна мультиплікативна похибка СВГР; γ_A – сумарна адитивна похибка СВГР; X_K – кінцеве значення діапазону вимірювання; X – вимірюване значення величини.

4.1.3 Розрахунок характеристик блоків структурної схеми

4.1.3.1 Розрахунок характеристик блока оптичного перетворення

Для знаходження відстані, на якій потрібно розташувати БОП, щоб отримати максимальний розмір зображення, скористуємося формулою лінзи (БОП можна вважати збиральною лінзою) [14]:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

де F – фокусна відстань БОП; d – відстань між лінзою і предметом; f – відстань між лінзою і зображенням.

Розміри предмета і отриманого зображення зв'яжемо між собою за допомогою формули лінійного збільшення лінзи:

$$\frac{x}{a} = \frac{y}{b} = \frac{f}{d},$$

де x та y – розміри кадру зображення; a і b – розміри об'єкту.

Кадр зображення може бути різних форматів. Найбільш поширені формати – FX і DX. Відмінність полягає в тому, що вони мають різний розмір області зображення матриці. Для формату FX – 36×24 mm, а для формату DX – 24×16 mm.

З огляду на номінальні розміри об'єкта і кадру, розташуємо фотокамеру так, щоб зображення об'єкта (висота $a=1000$ mm) при фотографуванні повністю зайняло висоту кадру (для формату FX – 24 mm, а для DX – 16 mm). При цьому будемо вважати, що поворот камери не здійснюється, тобто її положення фіксоване.

Розрахуємо відстань для БОП з фокусною відстанню $F=50$ mm і кадром формату FX (36×24 mm).

Підставимо в формулу збільшення лінзи:

$$\frac{24 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}} = \frac{50 \text{ mm}}{d}.$$

Отримаємо $d=2,1$ m.

Розрахуємо відстань для БОП з фокусною відстанню $F=50$ mm і кадром формату DX (24×16 mm).

Підставимо в формулу збільшення лінзи:

$$\frac{16 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}} = \frac{50 \text{ mm}}{d}.$$

Отримаємо $d=3,125$ m.

Рівняння перетворення БОП (по розміру об'єктиву):

$$L_{\text{вих1}} = L \cdot K_{\text{БОП}}$$

де $L_{\text{вих1}}$ – площа зображення на виході БОП (площа кадру); L – площа дійсного зображення об'єкту вимірювання, що надходить на вхід блока оптичного перетворення; $K_{\text{БОП}}$ – коефіцієнт перетворення БОП.

Номінальний коефіцієнт БОП:

$$K_{\text{БОП}} = \frac{L_{\text{вих1}}}{L}.$$

Номінальний коефіцієнт БОП для кадру формату FX дорівнює:

$$K_{\text{БОП1}} = \frac{L_{\text{вих1}}}{L} = \frac{864 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{10^{-6} \text{ m}^2} = 864.$$

Номінальний коефіцієнт БОП для кадру формату DX дорівнює:

$$K_{\text{БОП2}} = \frac{L_{\text{вих1}}}{L} = \frac{384 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2}{10^{-6} \text{ m}^2} = 384.$$

4.1.3.2 Розрахунок характеристик фотоматриці

Фотоматриця формує зображення у вигляді пікселів.

Піксель є неподільний об'єкт квадратної форми, що характеризується певним кольором.

На виході кожного пікселя фотоматриці формується електричний сигнал, пропорційний яскравості об'єкту з номінальним значенням 5 V.

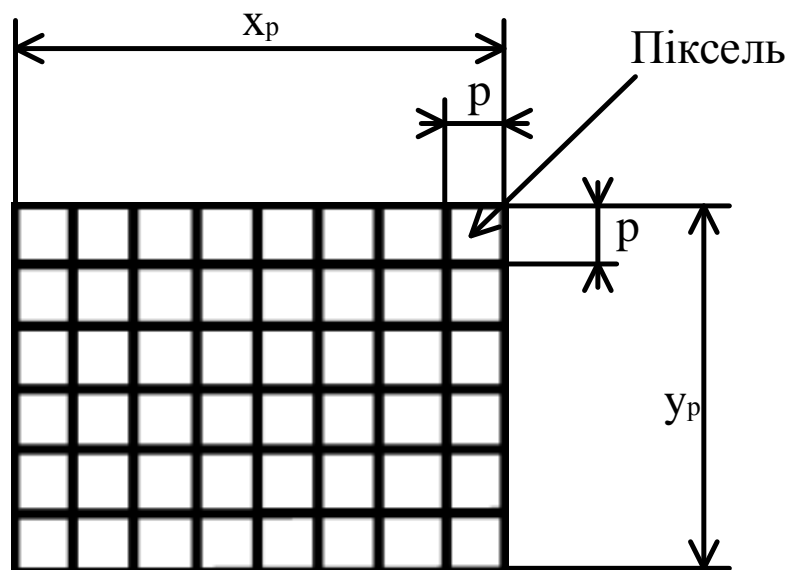


Рисунок 4.3 – Пікселі фотоматриці

На рисунку 4.3 позначено: x_p і y_p - довжина і ширина фотоматриці (кадру зображення) відповідно; p - довжина і ширина пікселя, що є рівними.

Розрахуємо необхідну кількість n -пікселів:

$$S_M = x_p \cdot y_p,$$

де S_M – площа фотоматриці.

$$S_M = S_{\Pi} \cdot N_{\Pi},$$

де S_{Π} – площа пікселя фотоматриці; N_{Π} – число пікселів фотоматриці.

Припустимо, що експозиція об'єкту повністю заповнює фотоматрицю, тобто

$$S_M = S_O,$$

де S_O – площа об'єкта.

Абсолютна похибка визначення розмірів об'єкта визначається за формулою:

$$\Delta S_O = \Delta a \cdot \Delta b,$$

де Δa – похибка визначення ширини об'єкта; Δb – похибка визначення довжини об'єкта.

Як було сказано вище, піксель є неподільний об'єкт квадратної форми, тоді:

$$\Delta a = \Delta b$$

$$\Delta a^2 = \Delta S_O.$$

Тоді:

$$\delta_{M_{P3}} = \frac{\Delta S_O}{S_M} \cdot 100\%,$$

де $\delta_{M_{P3}}$ – похибка роздільної здатності фотоматриці за площиною.

Похибка визначення розмірів об'єкта залежить від кожного пікселя. Залежить це від того, чи належить окремий піксель об'єкту на зображенні, чи ні тому:

$$\Delta a = p,$$

де p – довжина пікселя.

Звідси

$$S_{\Pi} = p^2,$$

$$\Delta S_O = S_{\Pi}.$$

$$N_{\Pi} = \frac{S_M}{S_{\Pi}} = \frac{S_M}{\Delta S_O} \cdot 100\%.$$

$$\delta_{M_{P3}} = \frac{\Delta S_O}{S_M} \cdot 100\% = \frac{\Delta S_O}{S_{\Pi} \cdot N_{\Pi}} \cdot 100\% = \frac{1}{N_{\Pi}} \cdot 100\%.$$

Похибка ФМ обумовлена наступними складовими:

- роздільна здатність;
- похибка перетворення в світловий потік.

$$\delta_M = \delta_{M_{P3}} + \delta_{M_{СП}},$$

де δ_M – відносна похибка фотоматриці; $\delta_{M_{СП}}$ – похибка перетворення в світловий потік фотоматриці.

Нехай:

$$\delta_{M_{P3}} = 0,02 \%;$$

$$\delta_{M_{СП}} = 0,0088 \%.$$

Так як $\Delta S_O = \Delta a^2$, тому

$$N_{\Pi} = \frac{1}{\delta_{M_{P3}}^2} = \frac{1}{(0,02 \cdot 10^{-2})^2} = 25 \text{ Мр.}$$

Розрахуємо площу одного пікселя ФМ:

$$S_{\Pi} = \frac{S_M}{N_{\Pi}}.$$

$$S_{\Pi F X} = \frac{864 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{25 \cdot 10^6 \text{ р}} = 34,6 \text{ мкм}^2.$$

Тоді:

$$N_{\Pi D X} = \frac{S_{MDX}}{S_{\Pi F X}} = \frac{384 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{34,6 \text{ мкм}^2} = 11 \text{ Мр.}$$

Рівняння перетворення ФМ (за яскравістю):

$$U_{\text{вих1}} = L_{\text{вх1}} \cdot K_{\text{ФМ}},$$

де $U_{\text{вих1}}$ – електричний сигнал на виході ФМ; $L_{\text{вх1}}$ – зображення на виході БОП, що проектується на один піксель; $K_{\text{ФМ}}$ - коефіцієнт перетворення ФМ.

Номінальний коефіцієнт перетворення ФМ при максимальній експозиції дорівнює:

$$K_{\text{ФМ}} = \frac{U_{\text{вих1}}}{L_{\text{вх1}}}.$$

Для форматів FX, DX:

$$K_{\text{ФМ1}} = \frac{U_{\text{вих1}}}{L_{\text{вх1}}} = \frac{5 \text{ V}}{34,6 \text{ } \mu\text{m}^2} = 0,14 \text{ V} / \mu\text{m}^2.$$

4.1.3.3 Розрахунок характеристик буферного підсилювача

Буферний підсилювач повинен узгоджувати за рівнем сигнали між фотоматрицею і АЦП.

Рівняння перетворення БП:

$$U_{\text{вих2}} = U_{\text{вх1}} \cdot K_{\text{БП}},$$

де $U_{\text{вих2}}$ – електричний сигнал на виході БП;

$U_{\text{вх1}}$ – електричний сигнал на виході ФМ;

$K_{\text{БП}}$ - коефіцієнт перетворення БП.

$$K_{\text{БП}} = \frac{U_{\text{вих2}}}{U_{\text{вх1}}} = \frac{5 \text{ V}}{5 \text{ V}} = 1.$$

4.1.3.4 Розрахунок характеристик аналого-цифрового перетворювача

Загальна похибка аналого-цифрового перетворювача складається з адитивної похибки квантування ($\gamma_{\text{кв}}$) і мультиплікативної похибки нелінійності ($\delta_{\text{нл}}$).

Кількість розрядів АЦП визначається:

$$n \geq \log_2 N,$$

де n - число розрядів АЦП; N - номінальне значення кількості ступенів квантування, яке визначається максимальною похибкою квантування:

$$N = \frac{1}{\gamma_{\text{кв}}}.$$

Наприклад $\delta_{\text{АЦП}}=0,0288\%$. Нехай $\gamma_{\text{кв}}=0,5$ $\delta_{\text{АЦП}}=0,00625\%$, тоді:

$$N = \frac{1}{\gamma_{\text{кв}}} = \frac{1}{0,00625} \cdot 100 = 16000,$$

де $\gamma_{\text{кв}}$ - похибка квантування АЦП.

Тоді:

$$n \geq \log_2 N = \log_2 16000 = 13,966 \Rightarrow n = 14$$

4.1.3.5 Розрахунок характеристик програмованого постійного запам'ятовуючого пристрою

ППЗП має забезпечувати безперебійне зберігання і читання мінімум 50 зображень роздільною здатністю не менше 4648×2748 пікселів.

Розрахуємо обсяг мінімальної необхідної пам'яті ППЗП [15]:

$$V_{\text{ППЗП}} = n_f \cdot M,$$

де $V_{\text{ППЗП}}$ – об'єм пам'яті ППЗП; n_f – мінімальна кількість фотографій; M – об'єм пам'яті, яке займає одне зображення.

$$M = I \cdot S,$$

де I – глибина кольору зображення; S – мінімально необхідна роздільна здатність.

Глибина кольору – кількість біт, що використовується для зберігання і представлення кольору при кодуванні одного пікселя зображення. Глибина кольору впливає на кількість кольорів в палітрі зображення, згідно формулі:

$$N_c = 2^i.$$

Нехай глибина кольору становить 24 біт.

24-бітний колір використовує по 8 біт для представлення червоного, синього і зеленого складових. Тоді кількість кольорів $N_c = 2^8 = 256$ різних варіантів для кожного каналу, або всього 16777216 кольорів ($256 \times 256 \times 256$).

Тоді:

$$M = 24 \text{ b} \cdot 3648 \cdot 2736 = 239542272 \text{ b} \approx 24 \text{ mb}.$$

$$V_{\text{ппзп}} = n_f \cdot M = 50 \cdot 24 \text{ mb} = 1200 \text{ mb}.$$

4.1.3.6 Вибір інтерфейсного блоку та дисплею

Інтерфейсний блок повинен забезпечувати зв'язок джерела вимірювальної інформації з ПЕОМ за допомогою цифрового інтерфейсу USB (Universal Serial Bus).

Дисплей підключається безпосередньо до портів вводу-виводу ПЕОМ, та повинен безперебійно забезпечувати користувача вихідними даними.

4.2 Методи покращення метрологічних характеристик засобів вимірювання геометричних розмірів отворів

4.2.1 Блок оптичного перетворення

4.2.1.1 Похибка позиціонування БОП

Для зменшення похибки позиціонування БОП потрібно використовувати більш точні засоби вимірювання відстані. Наприклад, лазерний далекомір BOSCH GLM 50. За технічними характеристиками далекоміра, абсолютна похибка вимірювання складає: $\pm 1 \text{ mm}$.

4.2.1.2 Похибка фокусування БОП

Для зменшення похибки фокусування БОП потрібно підбирати БОП з широким діапазоном фокусної відстані.

Відповідно аналізу похибки фокусування БОП, вона розраховується за формулою:

$$\delta_{\phi} = 2\lambda \cdot \left(\frac{D_{\text{БОП}}}{f}\right)^2.$$

Тоді, наприклад, для об'єктиву Nikon AF-S ED DX VR Nikkor, характеристики якого: $\lambda=38^\circ$; $D_{\text{БОП}}=F3.50 - F5.60$; $f=18 - 105 \text{ mm}$,

$$\delta_{\phi} = 2 \cdot 36 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \left(\frac{3,5 \text{ mm}}{105 \text{ mm}}\right)^2 = 0,0014 \text{ \%}.$$

А для об'єктиву Canon EFS USM, характеристики якого: $\lambda=53^\circ$; $D_{\text{БОП}}=F3.50 - F4.50$; $f=10 - 22 \text{ mm}$,

$$\delta_{\phi} = 2 \cdot 53 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \left(\frac{3,5 \text{ mm}}{22 \text{ mm}}\right)^2 = 0,047 \text{ \%}.$$

Тобто похибка фокусування буде менша у телеоб'єктивів, але потрібно розуміти, що у таких об'єктивів мінімальна відстань для фокусування становить

1,25 m, тому вони можуть не задовільнити мінімально задану відстань зйомки та діапазони розмірів об'єкту вимірювання.

4.2.1.3 Роздільна здатність БОП

Для зменшення похибки роздільної здатності БОП необхідно підбирати БОП з великою кількістю точок на дюйм – DPI.

Похибка роздільної здатності розраховується за формулою:

$$\gamma_{p.з} = \frac{1}{dpi} \cdot 100\% ,$$

де $\gamma_{p.з}$ – адитивна похибка роздільної здатності БОП; dpi – dots per inches (точок на дюйм).

Наприклад, для об'єктиву Nikon AF-S ED DX VR Nikkor роздільна здатність становить 4279 dpi, тому

$$\gamma_{p.з} = \frac{1}{dpi} \cdot 100\% = \frac{1}{4279} \cdot 100\% = 0,023 \text{ \%} .$$

А для об'єктиву Canon EFS USM роздільна здатність становить 5351 dpi, тому

$$\gamma_{p.з} = \frac{1}{dpi} \cdot 100\% = \frac{1}{5351} \cdot 100\% = 0,019 \text{ \%} .$$

Як бачимо, похибка роздільної здатності БОП менша у об'єктива з більшою роздільною здатністю. Проте співвідношення похибки роздільної здатності протилежна похибці фокусування.

Наведені приклади аналізу для БОП показують, що його характеристики суттєво впливають на сумарну похибку та тісно пов'язані між собою. Тому оптимізація похибок БОП повинна проводитись з урахуванням всіх складових, їх співвідношення та особливості вирішення задачі.

4.2.2 Фотоматриця

4.2.2.1 Роздільна здатність ФМ

Для зменшення похибки роздільної здатності необхідно підбирати фотоматрицю з великою кількістю мегапікселів.

Похибка роздільної здатності розраховується за формулою [9]:

$$\delta_{\text{МРЗ}} = \frac{1}{N_{\Pi}} \cdot 100\%,$$

де $\delta_{\text{МРЗ}}$ – мультиплікативна похибка роздільної здатності ФМ; N_{Π} – число мегапікселів ФМ.

Наприклад, для фотоматриці фотокамери Canon PowerShot A1000IS число мегапікселів ФМ становить 10 Мр, тому

$$\delta_{\text{МРЗ}} = \frac{1}{N_{\Pi}} \cdot 100\% = \frac{1}{10 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 0,1 \cdot 10^{-4}\%$$

А для фотоматриці фотокамери Nikon D600 число мегапікселів ФМ становить 24,7 Мр, тому

$$\delta_{\text{МРЗ}} = \frac{1}{N_{\Pi}} \cdot 100\% = \frac{1}{24,7 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 4,05 \cdot 10^{-6}\%$$

Як бачимо похибка роздільної здатності ФМ менша у об'єктива з більшим числом мегапікселів ФМ.

При цьому необхідно враховувати, що збільшення кількості пікселів з одночасним зменшенням площі кожного з пікселів приводить до збільшення шумів фотоматриці. Це, в свою чергу, призводить до необхідності їх зменшення.

4.2.2.2 Подавлення шуму зображень

Процедура подавлення шуму зображень застосовується для збільшення чіткості зображення, в якості попередньої обробки для подальших операцій [10].

При обробці цифрового зображення застосовуються методи просторового шумозаглушення. Найбільш часто на практиці застосовуються методи, що наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Методи подавлення шуму

Метод	Вплив на зображення	Особливості
Метод усереднення	Не зачіпає значно границі і деталі зображення	Знижує низькочастотний шум, який помітніше, ніж високочастотний
Медіанна фільтрація	Розмиття дрібних деталей	Не застосовується до крайніх пікселів
Математична морфологія	Зображення виглядає штучно	Для обробки фотореалістичних зображень не підходить
Фільтр Гауса	Деталі зображення розмиті	Уздовж границь залишається зашумлений контур
Метод на основі дискретного вейвлет перетворення	Не зачіпає значно границі і деталі зображення	Складність перетворення
Метод головних компонент (МГК)	Зображення залишається чітким	Метод добре справляється лише з білим шумом: у шуму не повинно бути ніякої структури, інакше МГК прийме його за візерунок і не придушить.
Анізотропна дифузія	Деталі зображення розмиті	Уздовж границь залишається зашумлений контур

На основі аналізу існуючих методів подавлення шуму можна виділити наступні методи: усереднення пікселів, медіанну фільтрацію і метод на основі дискретного вейвлет-перетворення. Обрані методи надають менший вплив на зображення: межі об'єктів виділяються чітко, форма об'єктів зберігається незмінною.

4.3 Висновки

В даному розділі була розроблена та проаналізована структурна схема СВГР. Для отримання цифрового зображення об'єкта обрана цифрова фотокамера, що випускається серійно.

Обробка отриманого за допомогою ЦФ зображення об'єкту вимірювання здійснюється за алгоритмом:

- 1) зчитування зображення об'єкту вимірювання;
- 2) знаходження меж об'єкту вимірювання;
- 3) розрахунок розмірів об'єкту вимірювання.

Проведено аналіз шляхів підвищення точності.

5 РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО МАКЕТУ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОТВОРІВ

Незважаючи на поширеність систем вимірювання геометричних розмірів об'єктів по їхньому зображенню недостатньо вирішено питання спеціалізованого програмного забезпечення, в якому проходить обробка отриманого зображення отвору та оцінки його метрологічних характеристик.

За результатами аналізу програмного забезпечення, що може використовуватись для визначення геометричних розмірів отворів по їх цифровому зображенню було запропоновано використовувати програмний пакет LabVIEW, оскільки він включає необхідні блоки приймання та обробки інформації, має високу наочність та простий у використанні.

Для створення віртуального макету нашої системи необхідно розглянути проходження інформації у вигляді світлового потоку через блок оптичного перетворення.

5.1 Модель блоку оптичного перетворення

Найпростіший БОП можна вважати двоопуклою лінзою, схема ходу променів якої наведена на рисунку 5.1 [16].

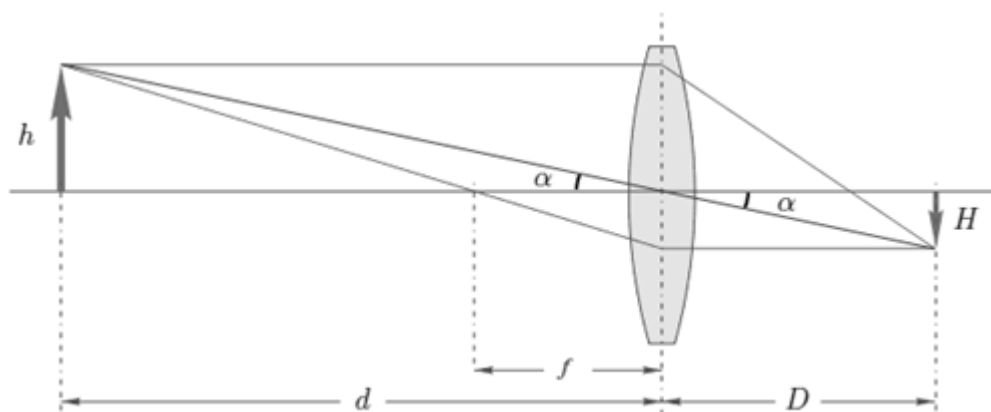


Рисунок 5.1 – Схема проходження променів крізь лінзу

Формула тонкої лінзи:

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}, \quad (5.1)$$

де d – відстань від лінзи ЦФ до об'єкту вимірювання; D – відстань від лінзи до фотоматриці; f – фокусна відстань, з якою було отримане зображення об'єкту вимірювання.

Для спрощення формули (5.1) помножимо ліву та праву частини рівняння на d :

$$1 + \frac{d}{D} = \frac{d}{f}. \quad (5.2)$$

Згідно рисунку 5.1 із властивості прямокутного трикутника:

$$\begin{aligned} d &= \frac{h}{\tan \alpha}, \\ D &= \frac{H}{\tan \alpha}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

де h – лінійний розмір об'єкту вимірювання; H – експозиція об'єкту вимірювання на фотоматрицю ЦФ.

Підставивши рівності (5.3) в ліву частину формули (5.2) отримуємо:

$$1 + \frac{h}{H} = \frac{d}{f}. \quad (5.4)$$

Зробивши прості перетворення з рівнянням (5.4) отримуємо:

$$h = \frac{H(d - f)}{f}. \quad (5.5)$$

Виходячи з наведених геометричних співвідношень достатньо просто представити модель БОП у вигляді моделі LabVIEW.

5.2 Моделювання системи вимірювання геометричних розмірів отворів в програмному пакеті LabVIEW

Для розробки віртуального макета було обране графічне середовище розробки додатків LabVIEW. Це середовище містить всі необхідні функції, структури та засоби обробки зображень для моделювання системи вимірювання геометричних розмірів об'єктів по їхньому зображенню [17].

Проаналізувавши структурну схему та попередні вимоги до її окремих блоків, був розроблений наступний алгоритм обробки вихідної інформації:

- 1) зчитування зображення об'єкту вимірювання;
- 2) знаходження меж об'єкту вимірювання;
- 3) розрахунок розмірів об'єкту вимірювання.

З урахуванням наведеного вище алгоритму обробки вихідної інформації був розроблений наступний віртуальний макет в середі LabVIEW, передня панель якого наведена на рисунку 5.2. Блок-діаграма віртуального макету наведена на рисунку 5.3.

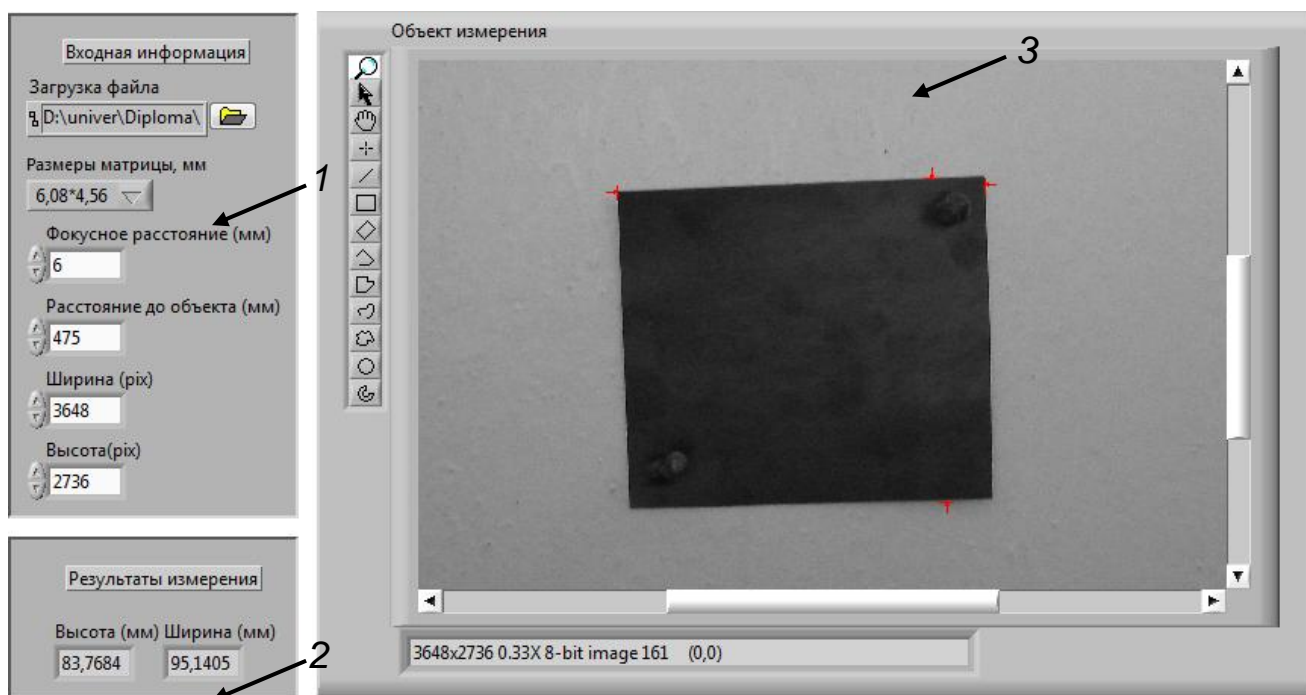


Рисунок 5.2 – Вікно користувача віртуального макету

На рисунку 5.2 позначено: 1 – блок вхідної інформації про параметри ЦФ і цифрового зображення об’єкта; 2 – блок виведення результатів вимірювання геометричних розмірів зображення отвору; 3 – блок виведення зображення об’єкта і його меж.

Блок вхідної інформації про параметри ЦФ і цифрового зображення отвору дозволяє встановити всі необхідні для подальшого обчислення розмірів отвору параметри. Розміри матриці, фокусна відстань, ширина і висота поля зображення в пікселях визначаються технічними характеристиками ЦФ і вибраними в ній режимами роботи. Значення цих параметрів досить стабільні і не залежать від об’єкта вимірювання.

Блок виведення результатів вимірювання видає розраховане значення довжини та ширини об’єкту в формі, сприятливій для користувача.

Блок виведення зображення об’єкта і його меж виводить на дисплей зображення об’єкту та автоматично розраховані межі об’єкту.

На рисунку 5.3 позначено: 1 – блок зчитування зображення об’єкту вимірювання; 2 – блок автоматичного знаходження меж об’єкту та розрахунку довжини та ширини об’єкту в пікселях; 3 – блок розрахунку ширини об’єкту вимірювання;

Блоки розрахунку ширини та довжини об'єкту вимірювання використовують отриману вище формулу (5.5) і реалізовані у вигляді стандартних обчислювальних структур LabVIEW – Formula Node.

На вхід структури подається вхідна інформація про фотокамеру та зображення об'єкту, що отримане за допомогою цієї фотокамери: фокусна відстань, відстань до об'єкту, ширина та довжина зображення в пікселях, розміри фотоматриці фотокамери. На виході структури отримуємо розраховане значення ширини та довжини об'єкту вимірювання, розраховані за заданим алгоритмом.

5.3 Висновки

В даному розділі було розглянуто блок оптичного перетворення інформації та отримано необхідні розрахункові співвідношення.

Обробка отриманого за допомогою ЦФ зображення об'єкту вимірювання здійснюється за алгоритмом:

- зчитування зображення об'єкту вимірювання;
- знаходження меж об'єкту вимірювання;
- розрахунок розмірів об'єкту вимірювання.

На підставі цього алгоритму обробки вихідної інформації ЦФ був розроблений віртуальний макет в програмному середовищі LabVIEW.

6 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОТВОРІВ

Вплив похибки перетворення фотоматриці, похибки аналого-цифрового перетворювача, похибки мікропроцесора, похибки роздільної здатності БОП та впливу шумів фотоматриці в даній роботі не досліджуються, оскільки визначаються характеристиками ЦФ, що обрана стандартною.

Для дослідження віртуального макету для імітації отвору використовується прямокутний об'єкт, що зображений на рисунку 6.1 і має розміри:

- висота $a=84\text{ mm}$;
- ширина $b=95\text{ mm}$.

Розміри об'єкту вимірювались штангенциркулем. Похибка вимірювання розмірів a та b дорівнює $0,1\text{ mm}$.

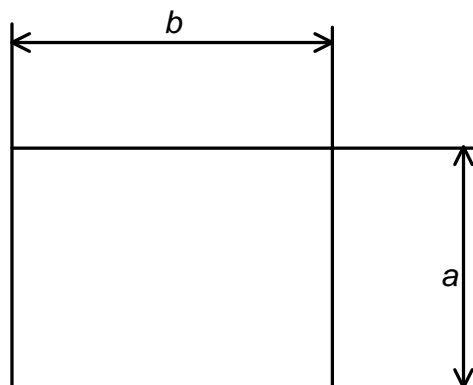


Рисунок 6.1 – Досліджуваний об'єкт

Для загального дослідження віртуального макету, дослідження впливу похибки позиціонування об'єкту, похибки фокусування БОП, похибки роздільної здатності фотоматриці були накопичені дані по 5 фотографіях вимірюваного об'єкту на різних відстанях.

6.1 Дослідження похибки алгоритму обчислення геометричних розмірів об'єкту

Похибки, що виникають в стандартних блоках обробки зображень LabVIEW не досліджуються, оскільки відсутня інформація щодо їхньої внутрішньої будови. Тому далі аналізуються лише похибки, що виникають при обчисленні за формулами.

Розміри об'єкту вимірювання в віртуальному макеті розраховуються за формулою:

$$h = \frac{H(d - f)}{f},$$

де h – лінійний розмір об'єкту вимірювання; H – експозиція об'єкту вимірювання на фотоматрицю ЦФ; d – відстань від лінзи ЦФ до об'єкту вимірювання; f – фокусна відстань, з якою було отримане зображення об'єкту вимірювання.

Алгоритм обчислень з урахуванням похибок окремих арифметичних операцій:

$$N_{Z_{обч}} = \left\{ \frac{(d - f)(1 + \delta_{від})H(1 + \delta_{мн})}{f} (1 + \delta_{діл}) \right\},$$

де $\delta_{від}$ – відносна похибка віднімання; $\delta_{мн}$ – відносна похибка множення; $\delta_{діл}$ – відносна похибка ділення; $N_{Z_{обч}}$ – алгоритм обчислення віртуального макету.

Рівняння сумарної похибки обчислень:

$$\delta_{обч} = \frac{\Delta_{обч}}{N_Z} = \frac{N_{Z_{обч}} - N_Z}{N_Z} = \frac{N_{Z_{обч}}}{N_Z} - 1,$$

де $\delta_{обч}$ – відносна похибка обчислень; $\Delta_{обч}$ – абсолютна похибка обчислень; N_Z – алгоритм обчислення.

Звідси

$$\delta_{обч} = (1 + \delta_{від})(1 + \delta_{мн})(1 + \delta_{діл}) - 1.$$

Виключаючи величини другого та вище порядку малості отримуємо:

$$\delta_{обч} = \delta_{від} + \delta_{мн} + \delta_{діл}.$$

СКВ похибки обчислення знаходиться за формулою:

$$\sigma [\delta_{обч}] = \sqrt{D [\delta_{обч}]},$$

де $D[\delta_{обч}]$ – дисперсія похибки обчислень.

$$D [\delta_{обч}] = D [\delta_{від}] + D [\delta_{мн}] + D [\delta_{діл}].$$

Звідси:

$$D [\delta_{обч}] = \frac{1}{3} 2^{-2(n+1)} + \frac{1}{3} 2^{-2(n+1)} + \frac{1}{3} 2^{-2(n+1)} \left[1 + 2 \left(\frac{h_{\max}}{h_{\min}} \right)^2 \right],$$

де n – розрядність мікроконтролера ПЕОМ; h_{\max} – максимальне значення діапазону вимірювання розмірів об'єкту; h_{\min} – мінімальне значення діапазону вимірювання розмірів об'єкту.

Так як віртуальний макет має граничне значення мегапікселів – 10, тому $h_{\max} = 10 \text{ Мр}$, а $h_{\min}=1$, тоді:

$$D [\delta_{обч}] = \frac{1}{3} 2^{-2(64+1)} + \frac{1}{3} 2^{-2(64+1)} + 2^{-2(64+1)} \left[1 + 2 \cdot \frac{10 \cdot 10^6}{1} \right] = 1,5 \cdot 10^{-32}.$$

Таким чином середньоквадратичне відхилення похибки обчислення СКВ дорівнює:

$$\sigma [\delta_{обч}] = \sqrt{D [\delta_{обч}]} = \sqrt{1,5 \cdot 10^{-32}} = 1,2 \cdot 10^{-16}.$$

Похибка алгоритму обчислення геометричних розмірів об'єкту дуже мала, тому може не враховуватись.

6.2 Загальне дослідження роботи віртуального макету

Результати вимірювання розмірів об'єкту в віртуальному макеті зображені на рисунку 6.2.

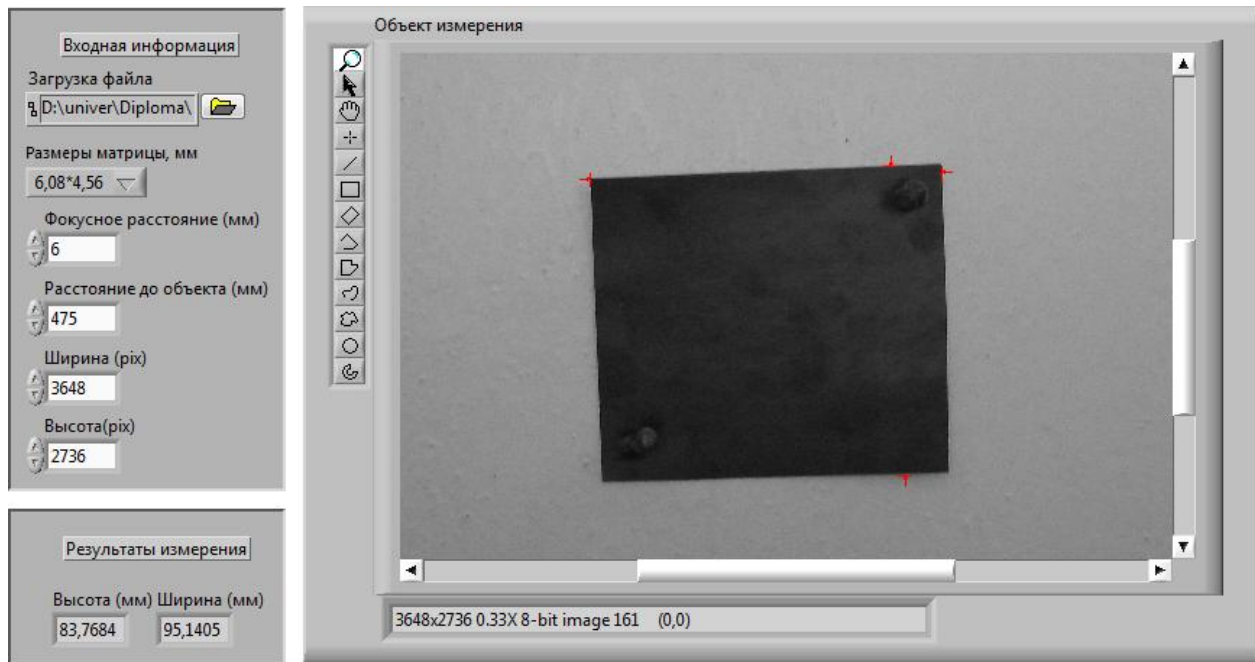


Рисунок 6.2 – Результати вимірювання розмірів об'єкту в віртуальному макеті

Відносна похибка визначення розмірів об'єкту в віртуальному макеті розраховується за формулою [20]:

$$\delta_{\text{вм}} = \left| \frac{X_{\text{визн}} - X_{\text{д}}}{X_{\text{д}}} \right| \cdot 100\%, \quad (6.1)$$

де $\delta_{\text{вм}}$ – відносна похибка вимірювання розмірів об'єкту; $X_{\text{д}}$ – дійсне значення розміру об'єкту; $X_{\text{визн}}$ – значення розміру об'єкту, що визначений віртуальним макетом.

Відповідно до формули (6.1) відносна похибка визначення розміру об'єкту:

— за висотою

$$\delta_{\text{вмв}} = \left| \frac{83,7684 \text{ mm} - 84 \text{ mm}}{84 \text{ mm}} \right| \cdot 100\% = 0,28\% .$$

— за шириною

$$\delta_{\text{вм ш}} = \left| \frac{95,1405 \text{ m m} - 95 \text{ m m}}{95 \text{ m m}} \right| \cdot 100\% = 0,15\% .$$

— за площею

$$\delta_{\text{вм п}} = \left| \frac{7969,767 \text{ m m}^2 - 7980 \text{ m m}^2}{7980 \text{ m m}^2} \right| \cdot 100\% = 0,13\% .$$

Обчислимо розрахункове значення похибки вимірювання.

Відстань від об'єкту до фотокамери вимірювалась рулеткою довжиною 3 m з абсолютною похибкою вимірювання $\pm 0,6 \text{ mm}$. Тобто похибка вимірювання на відстані 475 mm дорівнює:

$$\delta_{\text{відст}} = \frac{\Delta_p}{d} \cdot 100\% = \frac{0,6 \text{ m m}}{475 \text{ m m}} \cdot 100\% = 0,13\% ,$$

де $\delta_{\text{відст}}$ – відносна похибка вимірювання відстані від об'єкту до фотокамери; Δ_p – абсолютна похибка вимірювання рулетки; d – відстань від об'єкту до фотокамери.

Вважаючи, що похибка випадкова і розподілена за нормальним законом, СКО зведеної похибки обчислення для довірчої ймовірності $P = 0,997$:

$$\sigma_{\text{відст}} = \frac{\delta_{\text{відст}}}{3} = \frac{0,13}{3} = 4 \cdot 10^{-2} \% .$$

Похибка фокусування БОП розраховується за формулою:

$$\delta_{\Phi} = 2\lambda \cdot \left(\frac{D_{\text{БОП}}}{f} \right)^2 = \frac{47^0 \cdot \pi}{180} \cdot \left(\frac{2,7}{6} \right)^2 = 0,17\%$$

Вважаючи, що похибка випадкова і розподілена за нормальним законом, СКО зведеної похибки обчислення для довірчої ймовірності $P = 0,997$:

$$\sigma_{\Phi} = \frac{\delta_{\Phi}}{3} = \frac{0,17}{3} = 6 \cdot 10^{-2} \% .$$

Роздільна здатність БОП – 5342 dpi. Похибка роздільної здатності розраховується за формулою:

$$\gamma_{p.3} = \frac{1}{5342} \cdot 100\% = 0,019\%$$

Вважаючи, що похибка випадкова і розподілена за нормальним законом, СКО зведеної похибки обчислення для довірчої ймовірності $P = 0,997$:

$$\sigma_{p.3} = \frac{\gamma_{p.3}}{3} = \frac{0,019}{3} = 6 \cdot 10^{-3} \% .$$

Кількість пікселів фотокамери – 10 Мр. Похибка роздільної здатності ФМ розраховується за формулою:

$$\delta_{m.p.3} = \frac{1}{N_{\Pi}} \cdot 100\% = \frac{1}{10 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 1 \cdot 10^{-5} \%$$

Вважаючи, що похибка випадкова і розподілена за нормальним законом, СКО зведеної похибки обчислення для довірчої ймовірності $P = 0,997$:

$$\sigma_{m.p.3} = \frac{\delta_{m.p.3}}{3} = \frac{1 \cdot 10^{-5}}{3} = 3,3 \cdot 10^{-6} \% .$$

Кількість розрядів АЦП фотокамери – 12.

$$\gamma_{KB} = \frac{1}{2^{12}} = 2,4 \cdot 10^{-4}$$

$$\delta_{HJ} \approx \gamma_{KB} \approx 2,4 \cdot 10^{-4}$$

Похибка квантування АЦП має рівномірний закон розподілення, тоді СКВ:

$$\sigma_{KB} = \frac{\gamma_{KB}}{2\sqrt{3}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4}}{2\sqrt{3}} = 0,7 \cdot 10^{-4} \% .$$

Припустимо, що похибка нелінійності АЦП має рівномірний симетричний закон розподілення, тоді СКВ:

$$\sigma_{\text{нл}} = \frac{\delta_{\text{нл}}}{\sqrt{3}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \% .$$

Сумарне СКВ адитивної похибки:

$$\sigma_{\Sigma}(\gamma_A) = \sqrt{\sigma_{\text{Р.З}}^2 + \sigma_{\gamma_{\text{КВ}}}^2} = \sqrt{(6 \cdot 10^{-3})^2 + (0,7 \cdot 10^{-4})^2} = 0,06 \% .$$

Оскільки $\sigma_{\text{Р.З}}$ є домінуючою і розподілена за нормальним законом, тому вважаємо, що закон розподілення сумарної похибки – нормальний.

Приведене значення сумарної адитивної похибки з довірчою ймовірністю $P=0,997$:

$$\gamma_A = 3 \cdot \sigma_{\Sigma}(\gamma_A) = 3 \cdot 0,06 = 0,18 \% .$$

Сумарне СКВ мультиплікативної похибки:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Sigma}(\delta_M) &= \sqrt{\sigma_{\text{відст}}^2 + \sigma_{\phi}^2 + \sigma_{\text{МР.З}}^2 + \sigma_{\text{нл}}^2} = \\ &= \sqrt{(4 \cdot 10^{-2})^2 + (6 \cdot 10^{-2})^2 + (3,3 \cdot 10^{-6})^2 + (1,5 \cdot 10^{-4})^2} = 0,07 \% . \end{aligned}$$

Оскільки $\sigma_{\text{відст}}$ є домінуючою і розподілена за нормальним законом, то вважаємо, що закон розподілення сумарної похибки – нормальний.

Сумарна мультиплікативна похибка з довірчою ймовірністю $P=0,997$:

$$\delta_M = 3 \cdot \sigma_{\Sigma}(\delta_M) = 3 \cdot 0,07 = 0,21 \% .$$

Сумарна відносна похибки СВГР:

— за висотою

$$\delta_{\Sigma_B} = \pm [\delta_M + \gamma_A] = \pm [0,21 + 0,18] = \pm 0,39 \% ;$$

— за шириною

$$\delta_{\Sigma_{\text{ш}}} = \pm [\delta_M + \gamma_A] = \pm [0,21 + 0,18] = \pm 0,39 \% ;$$

— за площею

$$\delta_{\Sigma\Pi} = \pm [\delta_M + \gamma_A] = \pm [0,21 + 0,18] = \pm 0,39\% .$$

6.3 Дослідження впливу похибки позиціонування об'єкту

Для дослідження впливу похибки позиціонування було зроблено 3 фотографії об'єкту на відстані $d=472$, $d=475$ та $d=477$, при цьому при розрахунку розмірів об'єкту в віртуальному макеті значення відстані $d=475$ не змінювалось.

Результати вимірювання та розрахована похибка представлені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати вимірювання та розрахована похибка

Відстань	Результати вимірювання			Похибка вимірювання, $\delta_{\text{вим}}$		
	Висота, mm	Ширина, mm	Площа, mm ²	Висота, %	Ширина, %	Площа, %
472 mm	82,8753	93,9925	7789,657	1,3	1,1	2,4
475 mm	83,7684	95,0054	7958,45	0,28	0,006	0,27
477 mm	83,2325	94,3976	7856,948	0,91	0,63	1,5

Обчислимо розрахункове значення похибки вимірювання.

Відповідно до алгоритму розрахунку розмірів об'єкту:

$$h = \frac{H(d - f)}{f}.$$

Похибка вимірювання відстані:

$$\Delta h = f(\Delta d).$$

Звідси:

$$(h + \Delta h) = \frac{H((d + \Delta d) - f)}{f},$$

$$\Delta h = \frac{H((d + \Delta d) - f)}{f} - h.$$

Розрахункове значення похибки вимірювання наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Розрахункове значення похибки вимірювання

Похибка вимірювання відстані, Δh , mm	Результати вимірювання		
	Висота, %	Ширина, %	Площа, %
3 mm	0,63	0,63	0,63
0 mm	0	0	0
2 mm	0,42	0,42	0,42

Графіки залежності відносної похибки вимірювання віртуального макету та розрахункової відносної похибки вимірювання СВГР від відстані по висоті, ширині та площі наведено на рисунках 6.3, 6.4 та 6.5 відповідно.

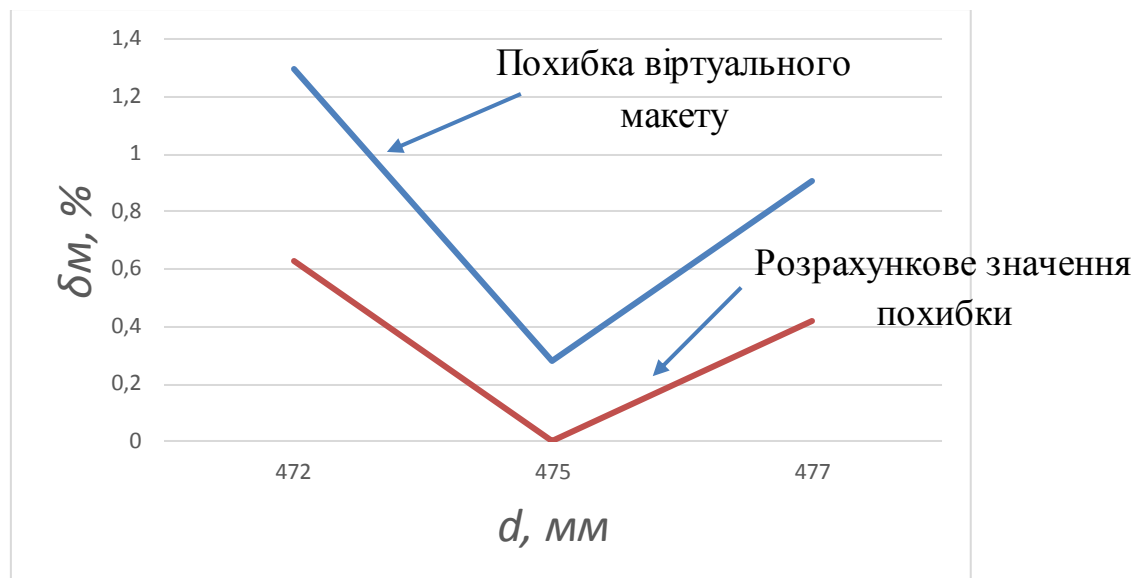


Рисунок 6.3 – Графік залежності відносної похибки вимірювання віртуального макету та розрахункової відносної похибки вимірювання СВГР від відстані за висотою

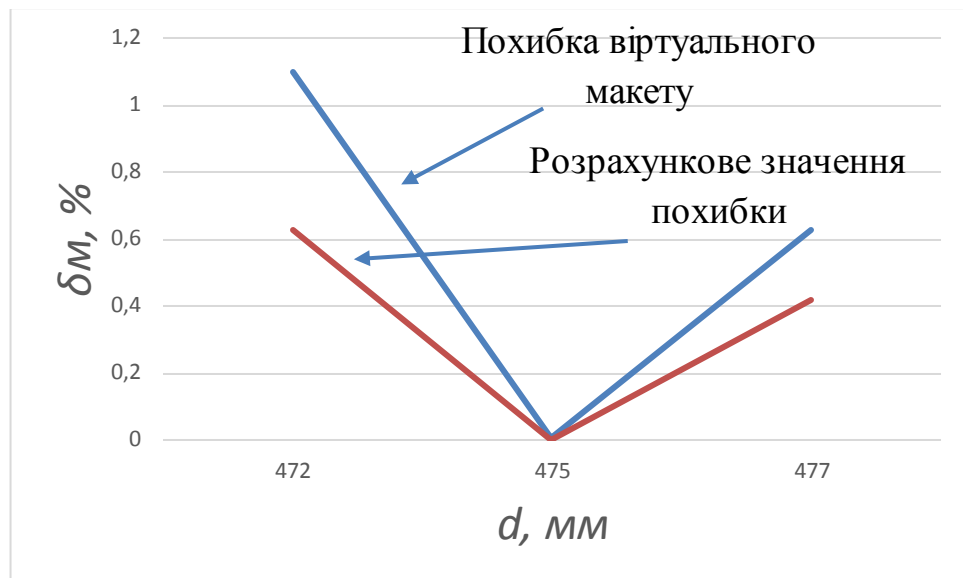


Рисунок 6.4 - Графік залежності відносної похибки вимірювання віртуального макету та розрахункової відносної похибки вимірювання СВГР від відстані за шириною

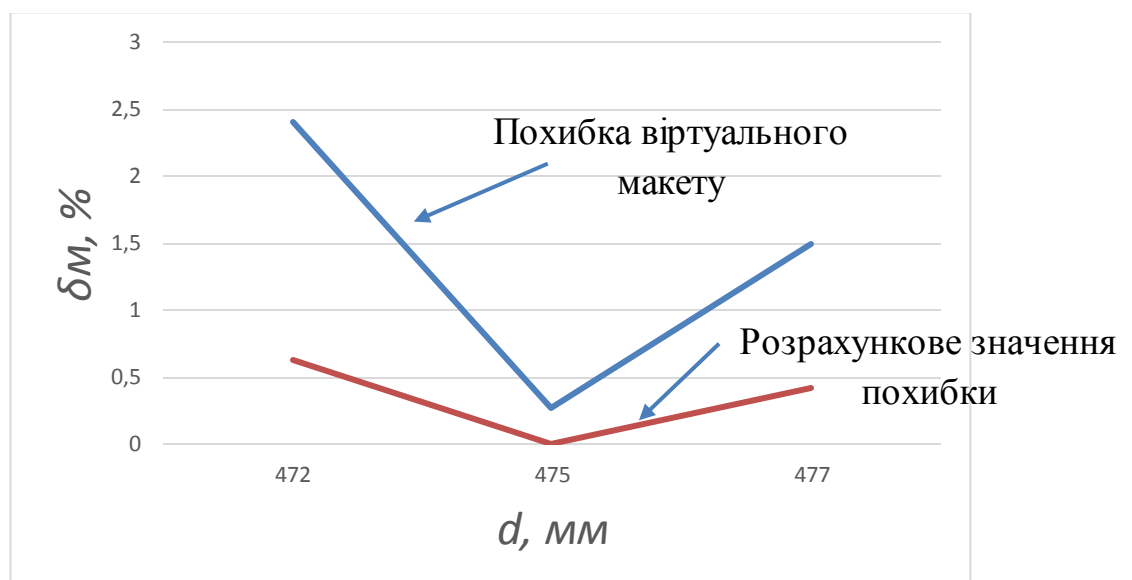


Рисунок 6.5 - Графік залежності відносної похибки вимірювання віртуального макету та розрахункової відносної похибки вимірювання СВГР від відстані за площею

Висновок: при дослідженні впливу похибки позиціонування об'єкту були отримані графіки залежності відносної похибки вимірювання віртуального макету та розрахункової відносної похибки вимірювання СВГР від відстані. Як видно з рисунків 6.3, 6.4, 6.5 відносна похибка віртуального макету має однакову форму з розрахунковою відносною похибкою вимірювання СВГР, що може казати про однаковий розподіл похибки вимірювання.

6.4 Дослідження алгоритму знаходження границь об'єкту в віртуальному макеті

При дослідженні віртуального макету були отримані суперечливі результати. А саме при дослідженні похибки фокусування БОП похибка віртуального макету має протилежну залежність до розрахункової похибки.

Виходячи з отриманих результатів дослідження віртуального макету з'явилась необхідність дослідження алгоритму знаходження границь об'єкту.

Блок автоматичного знаходження меж об'єкту віртуального макету має 3 “фільтри” знаходження границь об'єктів:

- 1) Fine;
- 2) Normal;
- 3) Contour tracing.

Для дослідження впливу вибору “фільтра” на точність обчислення розмірів об'єкту в віртуальному макеті для одної фотографії об'єкту обчислимо розміри, з різними “фільтрами”.

Результати вимірювання та розрахована похибка представлені в таблиці 6.3.

Як бачимо найточніші результати вимірювання розмірів об'єкту має “фільтр” Fine. А “фільтр” Contour tracing некоректно знаходить границю об'єкту по ширині.

Для точної роботи віртуального макету необхідно вдосконалення стандартного алгоритму розпізнавання границь об'єкту.

Таблиця 6.3 – Результати вимірювання та розрахована похибка

Фільтр	Результати вимірювання			Похибка вимірювання, $\delta_{\text{вим}}$		
	Висота, mm	Ширина, mm	Площа, mm ²	Висота, %	Ширина, %	Площа, %
Fine	86,171	95,1633	8008,307	0,2	0,15	0,35
Normal	85,6209	96,9691	8112,366	1,7	0,03	1,66
Contour tracing	85,1506	99,0683	8636,002	1,6	6,3	5,7

6.5 Висновки

В даному розділі було проведене дослідження метрологічних характеристик розробленої системи вимірювання геометричних розмірів об'єктів, а саме:

- 1) загальне дослідження віртуального макету;
- 2) дослідження впливу похибки позиціонування об'єкту;
- 3) дослідження алгоритму знаходження границь об'єкту в віртуальному макеті;

Для проведення досліджень були накопичені дані – для кожного з досліджень було зроблено по 5 фотографій по результатам вимірювання яких було розраховано середнє значення результату вимірювання розмірів об'єкту. Середнє значення вимірювання розміру об'єкту використовується для розрахунку похибки віртуального приладу.

При дослідженні впливу похибки позиціонування об'єкту були отримані графіки залежності відносної похибки вимірювання віртуального макету та розрахункової відносної похибки вимірювання СВГР від відстані. На графіках видно, що відносна похибка віртуального макету має однакову форму з розрахунковою відотною похибкою вимірювання СВГР, що може казати про однаковий розподіл похибки вимірювання.

7 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

У цьому розділі буде проведено маркетинговий аналіз стартап проекту з метою визначення принципової можливості його впровадження на ринку та можливих напрямів впровадження.

7.1 Опис ідеї проекту

Маркетинговий аналіз стартап-проекту дозволяє окреслити можливості його впровадження на ринку, можливі вектори розвитку проекту, вигоди, які може отримати користувач товару тощо. У табл. 7.1 наведено опис ідеї стартап-проекту.

Таблиця 7.1 – Опис ідеї стартапу

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система вимірювання геометричних розмірів об'єктів за їхніми зображеннями	Операції вимірювань геометричних параметрів об'єктів на підприємствах (вимірювання та калібрування)	Підвищення швидкості та якості вимірювань за рахунок усунення людського фактору

...

Аналіз потенційних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначення проектів-конкурентів та/або товарів-аналогів, що вже існують на ринку та порівняння їхніх техніко-економічних показників з пропонованим продуктом;
- порівняльний аналіз показників.

Визначення сильних (S), нейтральних (N) та слабких (W) сторін ідеї запропонованого стартап проекту наведені у табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ з/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	потенційні товари-конкуренти		Характеристика
		Запропонований проект	Калібрувальна система від компанії Infralab	
1.	Призначення	різні напрямки використання	орієнтованість лише на калібрування сит	N
2.	Робота з обладнанням	орієнтованість на широкий спектр обладнання	система включає обладнання і орієнтована лише на нього	S
3.	Точність	відносно низька через залежність від обладнання	висока	W
4.	Вартість (потенційна)	залежить від використаного обладнання	висока за рахунок спеціалізованого обладнання	N

Аналіз економічно-технічного потенціалу проекту у порівнянні із пропозиціями конкурентів показав, що розроблена система відрізнятиметься від існуючих аналогів та замінників можливістю швидкої адаптації під нове обладнання та потенційною вартістю.

7.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати проект, відповідно до ідеї. Визначення технологічної здійсненності передбачає аналіз таких складових:

- за якою технологією буде виготовлено товар відповідно до ідеї?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Результати аудиту для представленої ідеї наведені у табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ з/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Система вимірювання геометричних розмірів отворів	алгоритми пошуку границь на цифровому зображенні	так	так (можливі закриті реалізації)
2.		камери з великою роздільною здатністю	так	так
3.		апаратні і програмні інтерфейси швидкісної передачі даних	так	так

Як бачимо, всі технології доступні та можуть бути використані під час реалізації проекту.

7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ринкових можливостей для запуску стартап-проекту застосовується для визначення ринкових можливостей, які можна використати під час впровадження, а також для визначення ринкових загроз, які можуть завадити реалізації проекту. Результати аналізу дозволяють скласти план розвитку проекту, враховуючи особливості ринку, пропозицій конкурентів та, головне, потреб потенційних користувачів.

Для даного проекту аналіз ринкових можливостей показав, зростання попиту на технології комп'ютерного зору та автоматизації вимірювань. Тим часом, як рішення конкурентів є або вузько спеціалізованими по своїй суті або у своїй реалізації застосовують спеціалізовані апаратні рішення. У таблиці 7.4 наведені потенційні групи користувачів розробленої системи.

Таблиця 7.4 – Потенційні споживачі

Ринкові потреби споживачів	Цільова аудиторія	Вимоги споживачів до послуг компанії
Автоматизація процедур вимірювання лінійних розмірів об'єктів з оптимальною точністю	Підприємства, що проводять вимірювання розмірів об'єктів у виробничому циклі.	До продукції: точність, якість та простота використання; До компанії: надійність.
Пришвидшення процесу калібрування геометричних розмірів отворів	Калібрувальні лабораторії	

Після визначення потенційних груп клієнтів проведемо аналіз ринкового середовища: складемо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту та факторів, що йому перешкоджають (табл. 7.5, 7.6).

Таблиця 7.5 – Потенційні фактори загроз

Фактори загроз	Опис загроз	Можливі дії компанії для протидії загрозам
Недостатня якість вимірювань	Недостатня для споживача якість вимірювань	Подальші дослідження з мінімізації похибки вимірювання та впровадження точніших алгоритмів обробки
Низька відомість	Недостатня кількість клієнтів	Таргетована реклама та реклама у спеціалізованих виданнях

Таблиця 7.6 – Потенційні фактори можливостей

Фактор можливостей	Зміст можливостей	Можливі дії компанії
Актуальність	Постійна необхідність у вимірюваннях та зростаючий інтерес до технологій машинного зору	Оптимізація розробленої системи для відповідності до потреб ринку

Загроз більше ніж можливостей, а загроза недостатньої якості вимірювання створює потенційно дуже не вигідну позицію у майбутній ринковій конкуренції. Варто задуматись над доцільністю запуску проекту.

У табл. 7.7 подано результати аналізу пропозицій на системи вимірювання розмірів об'єктів для визначення загальних особливостей ринкової конкуренції.

Таблиця 7.7 – Ступеневий аналіз ринкової конкуренції

	Особливості ринку конкуренції	У чому полягає дана особливість	Можливі дії компанії
1.	Олігополія	Наявність конкурентів зі схожими послугами	Надати ширші функціональні можливості
2.	Регіональна конкуренція	Гравці ринку – інтернаціональні підприємства	Надати споживачам вигідніші умови
3.	Міжгалузева	Гравці ринку у різних галузях	Зробити акцент на простоту використання та універсальність
4.	Товарно-видова конкуренція	Усі продукти гравців мають приблизно одне призначення	Охопити найбільший спектр призначення
5.	Нецінова конкурентна перевага	Функціональні можливості систем	Досягти функціональної переваги над продуктами конкурентів
6.	Не марочна конкуренція	Конкуренція за надання послуг	Розкрутка популярності власного проекту

Конкурентоспроможність може досягатися за умови реалізації гнучкого керування ціновою політикою. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності наведено у табл. 7.8.

Таблиця 7.8 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Функціональна перевага над конкурентами	Розроблювана система матиме можливість роботи з великою кількістю камер різних виробників
Простота використання	Більшість систем конкурентів є вузькоспеціалізованими та орієнтовані на спеціалістів, що мають досвід використання таких систем

За визначеними факторами конкурентоспроможності проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту. Результати аналізу наведені у табл. 7.9.

Таблиця 7.9 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін системи

№ з/п	Фактори конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів конкурентів у порівнянні із розроблюваним						
			-3	-2	-1	0	1	2	3
1.	Функціональна перевага над конкурентами	12				*			
2.	Простота використання	10		*					

За таблицею можна зробити висновок про сумнівність значної конкурентної переваги розроблюваного проекту. Проте, розділ потрібно якось робити, тому продовжимо.

Останнім етапом аналізу можливостей впровадження проекту на ринку є SWOT-аналіз, у якому розглядаються слабкі та сильні сторони, можливості та загрози. У таблиці 7.10 наведено результати SWOT-аналізу проекту.

Таблиця 7.10 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • функціональність; • простота використання; • швидкість обробки зображень 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> • наявність вузькоспеціалізованих конкурентів з досконалішим обладнанням; • залежність від функціональності блоків обробки зображень IMAQ Vision
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> • потенційна прибутковість (у віддаленій перспективі) 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> • недостатня точність для певних галузей • недостатня відомість проекту

Констатуємо значущість слабких сторін значно переважає над сильними.

Було вирішено розробляти проект власними силами, бо цей варіант не потребує залучення додаткових фінансових витрат, а отримання необхідних ресурсів є простішим та ймовірнішим.

7.4 Розробка ринкової стратегії проекту

Для формування ринкової стратегії спочатку необхідно визначитись зі стратегією за охопленням ринку. У табл. 7.9 подано вибір цільових груп користувачів.

Таблиця 7.9 – Цільові групи потенційних користувачів системи

Характеристика профілю цільової групи потенційних користувачів розробленої системи	Готовність користувачів користуватися новою системою	Очікуваний попит для цільової групи	Інтенсивність конкуренції у визначеному сегменті	Важкість входу у сегмент нових проектів
Виробничі підприємства	середня	середній	висока	середньо
Лабораторії	середня	низький	низька	середньо

В результаті аналізу потенційних груп клієнтів було обрано цільову групу – виробничі підприємства. Прийняте рішення використати в якості стратегії ринкового маркетингу – стратегію масового маркетингу – компанія працюватиме з усім ринком, пропонуючи стандартизовану систему.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку. У табл. 7.10 визначено базову стратегію розвитку.

Таблиця 7.10 – Визначення базової стратегії розвитку

Альтернативна стратегія розвитку проекту	Стратегія охоплення потенційного ринку	Ключові позиції конкурентоспроможності для визначеної альтернативи	Базова стратегія розвитку проекту
Стратегія зростання	Концентрований маркетинг	Продукт є дешевшим та простішим у використанні	Стратегія диференціації

В якості базової стратегії розвитку було обрано стратегію диференціації, яка передбачає надання системі важливих з точки зору споживачів властивостей, які роблять продукт відмінним від конкурентних. Така відмінність може бути як об’єктивною, так і суб’єктивною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування. Результати аналізу конкурентоспроможності поведінки для проекту представлені у табл. 7.11.

Таблиця 7.11 – Аналіз конкурентоспроможності поведінки

Чи буде проект першим на ринку?	Чи буде компанія відбирати у конкурентів користувачів та шукати нових?	Чи буде застосоване копіювання властивостей систем конкурентів?	Стратегія для конкурентної поведінки
На ринку існують подібні системи, але вони відрізняються функціоналом	Шукати нових клієнтів	Так. Максимальне наближення до метрологічних характеристик систем аналогів	Стратегія наслідування лідеру

Для встановлених груп користувачів програмної системи, визначеної стратегії розвитку та конкурентоспроможності було розроблено стратегію позиціонування, яка являє собою узгоджену систему рішень, щодо ринкової поведінки компанії, що визначає напрями її роботи на ринку (табл. 7.12).

Таблиця 7.12 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні пропозиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію
Якість вимірювальних операцій	Підвищення МХ системи	Система може працювати з широким спектром обладнання	Універсальність, точність
Простота використання	Просте як двері	Система працює використовуючи широко впроваджені рішення	Зручність, простота використання

7.5 Розробка маркетингової програми проекту

Маркетингова концепція товару передбачає, що найбільш важливими пріоритетами для споживачів є якість та функціональні характеристики товару. Це свідчить про те, що потенційні споживачі шукають інноваційні альтернативи існуючим рішенням і завжди намагаються знайти найкращий продукт, що є на ринку.

ку. Формування маркетингової концепції товару (система калібрування геометричних розмірів отворів), який отримає клієнт, описано у табл. 7.12.

Таблиця 7.12 – Маркетингова концепція

Потреба	Вигода, яку надає розроблена система	Ключові переваги над конкурентами
Вимірювання геометричних розмірів об'єктів	Надає можливість вимірювати геометричні розміри об'єктів на основі їхніх цифрових зображень	<ul style="list-style-type: none"> • цінова доступність; • функціональність; • простота використання.
Калібрування геометричних розмірів об'єктів		

У табл. 7.13 наведена трирівнева маркетингова модель товару, яка складається із наступних рівнів: уточнення головної ідеї продукту та його послуг, його фізичне представлення та процес надання системи користувачам.

Таблиця 7.13 – Маркетингова модель

Рівні моделі системи	Опис рівня
1. Товар за ідеєю	Система вимірювання геометричних розмірів об'єктів за їхніми цифровими зображеннями
2. Товар у реальному виконанні	Програма для ПЕОМ
3. Товар з підкріпленням	Графічний інтерфейс користувача (віртуальний прилад), можливість збереження результатів роботи системи.
Захист від копіювання відсутній	

Далі необхідно визначити оптимальну систему збуту. Для цього необхідно прийняти рішення:

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Розгляд оптимальної системи збуту для запропонованого проекту наведено у табл. 7.14.

Таблиця 7.14 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Клієнт виплачує гроші на рік, тоді до нього приходить спеціаліст із впровадження інформаційних систем і встановлює ПЗ на комп'ютер клієнта.	Встановлення і налаштування обладнання	Один посередник – спеціаліст із впровадження інформаційних систем	Канал збуту одного рівня

Тепер розробимо систему маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану систему позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів. Дану концепцію для проекту наведено у табл. 7.15.

Таблиця 7.15 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Клієнт намагається пришвидшити процедуру вимірювання	Спеціалізовані видання, соціальні мережі, мережа Інтернет	Дешевизна, широкий спектр підтримуваного обладнання, простота використання	Продемонструвати простоту використання, початкову та експлуатаційну якість	Показати можливість швидкого та точного вимірювання

7.6 Висновки

В даному розділі було повністю виконано перший етап розробки стартап проекту, а саме, маркетинговий аналіз проекту.

В результаті розробки стартап-проекту було створено маркетингову програму, яка містить концепцію товару, реклами та збуту розробленої системи, а також визначено альтернативні варіанти ринкової поведінки.

З огляду на потенційну групу клієнтів, а саме, виробничі підприємства та калібрувальні лабораторії, діяльність яких пов'язана з вимірюванням геометричних розмірів, та відносно невисоку точність вимірювання, немає перспектив проведення даного проекту.

Було проведено аналіз ідеї створення системи калібрування геометричних розмірів отворів та зроблено наступні висновки:

- розроблена система має сумнівний комерційний потенціал проекту;
- проект має непевні перспективи впровадження з врахуванням потенційних груп користувачів, бар'єрів для входження, стану конкуренції, конкурентоспроможності;
- подальша імплементація проекту не є доцільною.

ВИСНОВКИ

У цій роботі було розробка системи калібрування геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню, а також створено віртуальний макета для вимірювання геометричних розмірів отворів по їхньому зображенню на базі графічного середовища розробки додатків NI LabVIEW.

Аналіз існуючих вимірювачів та прикладів вимірювання геометричних параметрів отворів показав, що доцільне застосування оптико-електронного методу для вирішення задачі вимірювання геометричних параметрів отворів по їх зображенню.

Для створення моделі було обрано середовище графічного програмування LabVIEW через простоту створення програм, простоту взаємодії з обладнанням та наявність великої кількості інструментів для обробки зображень.

Для калібрування камери, як найважливішої частини системи, обрано алгоритм калібрування за зміною фокусної відстані, через його відносну простоту реалізації та достатньо високу точність.

Була розроблена та проаналізована структурна схема СВГР отворів, алгоритм обробки зображення та проведено аналіз шляхів підвищення точності вимірювання. На основі цього був розроблений віртуальний макет у середовищі LabVIEW.

Було проведено дослідження метрологічних характеристик створеного віртуального приладу.

Створена система дозволяє вимірювати та калібрувати геометричні розміри об'єктів, зокрема і отворів, з похибкою не більше 2,5%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абакумов И.И. Компенсация погрешностей оптико-электронной системы автоматизированного контроля геометрических параметров объектов: дис. канд. техн. наук – С-П., 2014. – 132 с.
2. Васильева И.И. Механические и оптико-механические приборы для линейных измерений – Л. , СЗПИ, 1978, – 80 с.
3. Кнорринг Г.М. Осветительные установки: Издательство: Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.
4. Сарвин А.А. Системы бесконтактных измерений геометрических параметров. – Л.: Изд. ЛГУ, 1983. – 144 с.
5. Соломатин А.Ю. Идентификация движущегося человека в системах видеонаблюдения – С-П.: Научно– технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2014 – с.124–131.
6. Kaehler A. Learning OpenCV 3 / A. Kaehler, G. Bradski., 2016. – 1026 с.
7. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. Л., 1966. – 563 с.
8. Хуанг Т. Обработка изображений и цифровая фильтрация: под редакцией. М.: Мир 1979. – 318 с.
9. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений. – М.: Мир, 1987. – 274 с.
10. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 400 с.
11. Сойфер В.А. «Компьютерная обработка изображения», изд. 2– е, испр., М.: Физматлит, 2003 г. – 784 с.
12. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration – США, 1998. – 325 с.
13. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно–измерительной техники. К., “Вища школа”, 1983 – 455 с.

14. Posada-Gómez R. Digital Image Processing Using LabView / Rubén Posada-Gómez et al. // Practical Applications and Solutions Using LabVIEW™ Software / Rubén Posada-Gómez., 2011. – С. 297–316.
15. Опадчий Ю. Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И. Аналоговая и цифровая электроника. – М., «Горячая линия – Телеком», 1999 – 768 с.
16. Вестон К. Цифровая зеркальная камера – М.: «Арт– Родник», 2007. – 192 с.
17. Блюм П. LabVIEW: стиль программирования – М., ДМК, 2008 – 397 с
18. Визильтер Ю., Желтов С., Князь В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision – М.: «ДМК Пресс», 2008. – 464 с.
19. Румшиский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
20. Миф Н. П. Модели и оценка погрешности измерений – М.: Изд– во стандартов, 1976. – 144 с.
21. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.